



**Francisco Pedro Vaz de Carvalho Lemos Abreu**

Licenciado em Ciências de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

## **Energia das Ondas: caracterização do recurso e avaliação de produção**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Orientador: João Miguel Murta Pina, Professor Doutor, FCT-UNL  
Co-orientador: Nuno Amaro, Doutor, R&D Nester

Júri

Presidente: Prof. Doutor Rui Alexandre Nunes Neves da Silva, FCT-UNL  
Arguente: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves, FCT-UNL  
Vogal: Prof. Doutor João Miguel Murta Pina, FCT-UNL



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

janeiro, 2019



## **Energia das Ondas: caracterização do recurso e avaliação de produção**

Copyright © Francisco Pedro Vaz de Carvalho Lemos Abreu, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





*Às minhas avós.*



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais, irmão e tia, cujo apoio, incentivo e compreensão de cada um foi preponderante e incansável ao longo da realização desta dissertação e do meu percurso académico.

À minha namorada por todo o apoio, palavras de confiança e incentivo essenciais em vários momentos, o meu muito obrigado.

À FCT-UNL em colaboração com a R&D Nester, quero agradecer a oportunidade de poder participar neste projeto. Considero toda a aprendizagem que obtive uma mais valia para o futuro.

Quero agradecer ao professor e orientador nesta tese de mestrado João Murta Pina por toda a disponibilidade, apoio e paciência demonstrada ao longo deste percurso.

Obrigado ao Doutor Nuno Amaro, pela tutoria e troca de conhecimentos imprescindíveis para a realização desta dissertação.

Quero dar um especial agradecimento também aos meus amigos e colegas da FCT-UNL, que sem eles nada faria sentido. O meu muito obrigado por toda a amizade, colaboração e força dada ao longo não só da realização desta dissertação como ao longo de todos estes anos.

Obrigado também, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para o culminar desta etapa mas que não estão aqui mencionados.



## RESUMO

---

Para que seja possível a conversão de energia das ondas em energia elétrica é necessário fazer um estudo detalhado do local de interesse para avaliar a possibilidade de investimento. Na presente dissertação apresenta-se o estudo do potencial energético em duas localizações distintas ao longo do Canhão da Nazaré.

O vasto potencial energético que as ondas marítimas têm em escala mundial, torna suscetível de interesse a sua conversão. Tendo em conta que em 2017 foram produzidos cerca de 900 GWh em Portugal a partir de dispositivos fotovoltaicos, o estudo de caracterização feito indica que a disponibilidade energética das ondas no local de interesse nesse período temporal apresenta valores que se podem equiparar à energia proveniente do sol.

No estudo feito são utilizados dados provenientes de modelos de ondas, visando obter um conjunto de informações sobre o comportamento dos estados do mar nos anos de 2016 e 2017, de forma a analisar as diferenças anuais e espaciais no recurso energético. Os modelos de ondas estimam, entre outros parâmetros, altura significativa e período médio das ondas, permitindo o cálculo de potência por frente de onda a cada estimação.

A avaliação da possível construção de uma central de produção elétrica engloba outros fatores determinantes como o de estudo da natureza geofísica do local, dos dispositivos WEC a serem utilizados na conversão e do planeamento financeiro que suporta o investimento.

**Palavras-chave:** Energia das ondas, Potencial energético, Altura significativa, Período médio, Potência por frente de onda.

---



## ABSTRACT

---

In order to convert wave energy into electrical energy, it is necessary to make a detailed study of the site of interest to evaluate the possibility of investment. In this dissertation it is presented the study of the energy potential in two distinct locations along the Nazaré Canyon.

The vast energy potential of the sea waves on a world scale makes it interesting to harness. Taking into account that in 2017 about 900 GWh were produced in Portugal from photovoltaic devices, the present characterization study indicates that the waves' energy availability at the site of interest in this time period presents values that can be equated to the energy from the sun.

In this study, data from wave models are used to obtain a set of information on the behavior of sea states in 2016 and 2017, in order to analyze the annual and spatial differences in the energy resource. The wave models estimate, among other parameters, significant height and mean period of the waves, allowing the calculation of power per wave front for each estimation.

The assesement of the possible construction of a power plant includes other determinant factors such as the study of the geophysical nature of the site of interest, the WEC devices to be used in the conversion and the financial planning that supports the investment.

**Keywords:** Wave energy, Energy potential, Significant height, Mean period, Power per wave front.

---





# ÍNDICE

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xvii</b>
<b>Glossário</b>	<b>xix</b>
<b>Siglas</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento e Motivações . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Contribuições Originais . . . . .	3
1.4 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução . . . . .	5
2.2 Caracterização das Ondas e Fundamentos Teóricos . . . . .	6
2.2.1 Teoria Linear das Ondas . . . . .	6
2.2.2 Energia Presente no Recurso . . . . .	10
2.3 Revisão Bibliográfica das Metodologias e Tecnologias Utilizadas na Recolha e Tratamento de Dados . . . . .	14
2.3.1 Instrumentos de Medição . . . . .	15
2.3.2 Análise Espectral . . . . .	19
2.3.3 Modelos de Ondas . . . . .	21
2.3.4 O programa <i>Copernicus</i> . . . . .	24
2.3.5 Ficheiros NetCDF . . . . .	25
<b>3 Levantamento de Dados e Metodologia Proposta</b>	<b>27</b>
3.1 Especificações Geográficas do Local de Interesse . . . . .	28
3.1.1 Enquadramento do Local . . . . .	28
3.1.2 Localização das Boias . . . . .	29
3.1.3 Funcionamento das Boias e Recolha de Dados . . . . .	30
3.2 Levantamento dos Dados de Interesse . . . . .	31
3.2.1 Tipo de Dados de Interesse . . . . .	31

3.2.2	Organização dos Dados . . . . .	32
3.3	Metodologia para Processamento de Dados . . . . .	33
3.3.1	Percentagem de Ocorrências de cada Estado do Mar . . . . .	33
3.3.2	Potência por Frente de Onda . . . . .	34
3.3.3	Contribuição de Energia de cada Estado do Mar . . . . .	35
3.3.4	Variabilidade Energética . . . . .	36
3.3.5	Picos Energéticos . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Análise dos Resultados Obtidos</b>	<b>39</b>
4.1	Percentagem de Ocorrências de Cada Estado do Mar . . . . .	40
4.1.1	Interpretação dos Resultados . . . . .	40
4.1.2	Análise Interanual . . . . .	43
4.1.3	Análise Espacial . . . . .	44
4.2	Matrizes de Energia . . . . .	45
4.2.1	Interpretação dos Resultados . . . . .	45
4.2.2	Análise Interanual e Espacial . . . . .	48
4.3	Variabilidade Energética . . . . .	49
4.3.1	Variabilidade Mensal e Anual . . . . .	49
4.3.2	Análise Espacial . . . . .	52
4.4	Picos Energéticos . . . . .	54
4.4.1	Monican01 . . . . .	54
4.4.2	Monican02 . . . . .	56
4.5	Análise Direcional . . . . .	58
4.5.1	Monican02 . . . . .	60
4.5.2	Monican01 . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Interpolação de Valores Energéticos</b>	<b>63</b>
5.1	Levantamento de Dados da Plataforma <i>Copernicus</i> . . . . .	64
5.2	Metodologia Utilizada . . . . .	65
5.3	Análise dos Resultados Obtidos . . . . .	68
5.3.1	Monican01 . . . . .	68
5.3.2	Monican02 . . . . .	69
5.3.3	Comparação de Resultados . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Conclusões Finais</b>	<b>71</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	72
	<b>Bibliografia</b>	<b>73</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice</b>	<b>77</b>
A.1	Metodologia Utilizada na Organização dos Dados (Monican01) . . . . .	77
A.2	Metodologia Utilizada na Organização dos Dados (Monican02) . . . . .	78

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Movimento assumido pelas partículas de água em baixa e alta profundidade (adaptado de [3]). . . . .	6
2.2	Onda sinusoidal monocromática. . . . .	7
2.3	Representação espacial de uma onda. . . . .	9
2.4	Caracterização da energia potencial presente por secção de área numa coluna de água (adaptada de [5]). . . . .	11
2.5	Diagrama de recolha e processamento de dados. . . . .	15
2.6	Boia de superfície multissensor [10]. . . . .	16
2.7	Dispositivo ADCP (adaptado de [12]). . . . .	17
2.8	Radar de Alta Frequência (adaptado de [13]). . . . .	18
2.9	Resultados de um caso de estudo realizado na Irlanda [16]. . . . .	20
2.10	Mapa de serviços disponibilizados pelo CMEMS [25]. . . . .	25
3.1	Constituição do Canhão da Nazaré [28]. . . . .	28
3.2	Observatório do Canhão da Nazaré [28]. . . . .	29
3.3	Plataforma <i>online</i> do MARETEC. [29] . . . . .	31
4.1	Percentagem de Ocorrências na Monican01 em 2016 e 2017. . . . .	41
4.2	Percentagem de Ocorrências na Monican02 em 2016 e 2017. . . . .	42
4.3	Matriz de Energia para a Monican01 em 2016 e 2017. . . . .	46
4.4	Matriz de Energia para a Monican02 em 2016 e 2017. . . . .	47
4.5	Comparação energética anual e mensal na Monican01. . . . .	50
4.6	Comparação energética anual e mensal na Monican02. . . . .	51
4.7	Comparação energética entre localizações em 2016. . . . .	52
4.8	Comparação energética entre localizações em 2017. . . . .	53
4.9	Picos energéticos em 2016 e 2017 na Monican01. . . . .	55
4.10	Curva de Duração da Disponibilidade do Recurso na Monican01. . . . .	56
4.11	Picos energéticos em 2016 e 2017 na Monican02. . . . .	57
4.12	Curva de Duração da Disponibilidade do Recurso na Monican02. . . . .	58
4.13	Comportamento direcional das ondas no dia 30 de agosto de 2018. [30] . . .	59
4.14	"Rosa das Ondas" sazonal em 2016 para a localização da boia Monican02. . .	60
4.15	"Rosa das Ondas" sazonal em 2017 para a localização da boia Monican02. . .	61

5.1	Representação geográfica dos quatro pontos da grelha mais próximos de cada boia. . . . .	66
5.2	Metodologia utilizada na interpolação; distância de cada ponto da grelha às respetivas localizações das boias. . . . .	67
A.1	Construção das <i>data frames</i> para os quatro pontos mais próximos da Monican01; <i>VTM10</i> - Período Médio; <i>VHM0</i> - Altura Significativa. . . . .	77
A.2	Construção das <i>data frames</i> para os quatro pontos mais próximos da Monican02; <i>VTM10</i> - Período Médio; <i>VHM0</i> - Altura Significativa. . . . .	78

## LISTA DE TABELAS

2.1	Velocidade de fase consoante a profundidade do mar. . . . .	8
3.1	Especificações geográficas das boias de superfície. . . . .	29
3.2	Tipos de parâmetros medidos pelas boias. . . . .	30
3.3	<i>Data frame</i> para a Monican01: primeiros cinco valores estimados. . . . .	32
3.4	<i>Data frame</i> para a Monican02: primeiros cinco valores estimados. . . . .	32
3.5	<i>Data frame</i> para a Monican01: primeiros cinco valores estimados de potência por frente de onda. . . . .	34
3.6	<i>Data frame</i> para a Monican02: primeiros cinco valores estimados de potência por frente de onda. . . . .	34
3.7	<i>Data frames</i> para a Monican02 e Monican01: variabilidade energética anual. .	36
3.8	<i>Data frames</i> para 2016 e 2017: variabilidade energética espacial. . . . .	37
4.1	Análise interanual para a Monican01. . . . .	43
4.2	Análise interanual para a Monican02. . . . .	43
4.3	Análise espacial em 2016. . . . .	44
4.4	Análise espacial em 2017. . . . .	44
4.5	Energia anual em cada localização. . . . .	45
4.6	Variação anual da maior contribuição de energia. . . . .	48
5.1	Coordenadas dos pontos geográficos da grelha mais próximos da localização da boia Monican01. . . . .	65
5.2	Coordenadas dos pontos geográficos da grelha mais próximos da localização da boia Monican02. . . . .	65
5.3	Distância de cada ponto da grelha à localização da boia Monican01. . . . .	68
5.4	Estimativa energética para os quatro pontos da grelha mais próximos da boia Monican01; estimativa energética anual para a localização da boia Monican01. .	68
5.5	Distância de cada ponto da grelha à localização da boia Monican02. . . . .	69
5.6	Estimativa energética para os quatro pontos da grelha mais próximos da boia Monican02; estimativa energética anual para a localização da boia Monican02. .	69
5.7	Comparação de resultados: estimativa na localização exata VS estimativa por via de interpolação. . . . .	70



## GLOSSÁRIO

$T$  Período.

$f$  Frequência.

$\lambda$  Comprimento de onda.

$k$  Número de onda.

$\omega$  Velocidade angular.

$h$  Profundidade ou distância ao fundo do mar.

$E_p$  Energia Potencial.

$E_k$  Energia Cinética.

$H_s$  Altura significativa das ondas.

$T_m$  Período Médio das ondas.

$\theta_m$  Direção média das ondas.

$P_{wave}$  Potência por frente de onda.

$E_{wave}$  Energia por frente de onda.

$E_{2016}$  Energia por frente de onda estimada em 2016.

$E_{2017}$  Energia por frente de onda estimada em 2017.

$E_{MARETEC}$  Energia por frente de onda estimada com base no modelo do [MARETEC](#).

$E_{Copernicus}$  Energia por frente de onda estimada com base em dados de um modelo levantados na plataforma [CMEMS](#).





## SIGLAS

**ADVP/ADCP** Acoustic Doppler Velocity/Current Profilers.

**AEMET-PdE** Agência Estatal de Meteorologia - Puertos del Estado (Espanha).

**CMEMS** *Copernicus* Marine Environment Monitoring Service.

**CRBE** Climate Research Branch of Environment Canada.

**DTI** Department of Trade and Industry (Reino Unido).

**ECMWF** European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

**IBI-MFC** Iberian-Biscay-Ireland Monitoring Forecasting Centre.

**IPMA** Instituto Português do Mar e da Atmosfera.

**MARETEC** Marine Environment and Technology Centre.

**MONICAN** MONItorização do CANhão da Nazaré.

**NATL50** North Atlantic 50 year Hindcast.

**NCEP** National Centers for Environmental Prediction (EUA).

**NetCDF** Network Common Data Form.

**NOAA** National Oceanic and Atmospheric Administration (EUA).

**OWI** Oceanweather Inc (EUA).

**SWRDA** South West of England Region Development Agency.

**UCAR** University *Consortium* for Atmospheric Research.

**UKMO** United Kingdom Meteorological Office.

**WAMDI** Wave Model Development and Implementation Group.

**WEC** Wave Energy Converter.

**XDR** eXternal Data Representation.



## INTRODUÇÃO

### 1.1 Enquadramento e Motivações

Com o crescimento da indústria petrolífera, o petróleo constituiu desde o século XX uma das fontes de energia mais utilizadas em todo o mundo. Desde então, seguiram-se décadas de elevada procura pelos combustíveis fósseis, contribuindo para a exaustão deste tipo de recurso. Com o possível esgotamento nas próximas décadas, surgiram novos esforços para voltar a aproveitar outras fontes de energia, conduzindo a uma nova era no mundo energético direcionada para um desenvolvimento sustentável.

O trabalho proposto nesta dissertação insere-se na temática de estudo de caracterização da disponibilidade energética de fontes primárias de energia que sejam renováveis. Neste caso, o recurso primário de energia em estudo são as ondas marítimas. Energia solar, hídrica, geotérmica, eólica, entre outras, têm dado o seu contributo à medida que a tecnologia para melhorar os índices de conversão tem acompanhado o crescimento destas indústrias. Pelo contrário, a indústria de conversão de energia das ondas ainda não atingiu uma taxa de maturidade que permita tornar-se numa indústria auto-sustentada, na medida em que os valores dos índices de conversão ainda não são suficientes para incentivar os investimentos financeiros. Deste modo, é necessário que sejam feitos esforços no que diz respeito ao desenvolvimento desta indústria, tendo em conta o enorme potencial energético que as ondas do mar têm, equiparando-se ao potencial energético proveniente do sol e do vento.

A energia das ondas é uma fonte primária de energia que é caracterizada, de uma forma geral, pela energia hidrodinâmica presente nas ondas do mar, representada pelos seus movimentos oscilatórios. Assim, nesta dissertação, o tema de estudo focar-se-á na caracterização e avaliação do recurso existente num local. Pretende-se que seja quantificada a energia presente nas ondas num local de estudo durante um determinado período

temporal. Este tipo de estudo pode ser muito complexo, tendo em conta que existem diversos fatores externos que afetam o comportamento hidrodinâmico das ondas como as condições atmosféricas e a natureza geofísica do local. É por esta razão que se deve realizar um estudo detalhado do local de interesse antes de decidir investir na instalação de equipamento destinado à conversão de energia.

O estudo da viabilidade económica de um projeto é também muito importante, pois só será rentável investir se o local de interesse for caracterizado e avaliado como tendo um elevado potencial energético. Neste caso, o objetivo é fornecer um conjunto de informação sustentada, avaliando e caracterizando o potencial energético das ondas do mar no local de interesse.

### 1.2 Objetivos

O trabalho proposto nesta dissertação terá como *input* dados referentes a parâmetros das ondas retirados de uma plataforma *online* gerida pelo MARETEC<sup>1</sup> (Centro de Investigação do Instituto Superior Técnico) que disponibiliza séries temporais com valores provenientes de um modelo numérico que faz a estimativa desses parâmetros hora a hora.

O objetivo principal é fazer o processamento e análise desses dados tendo como *output* histogramas com a percentagem de acontecimentos de diferentes estados do mar (caracterizados por altura significativa e período das ondas) relativos ao período temporal em que é feito o estudo. Para além disso, serão calculadas as matrizes energéticas que indicam o potencial energético de cada estado do mar. De acordo com a informação extraída será possível caracterizar a energia anual disponível no local de estudo. Para poder validar essa estimativa feita, proceder-se-á a uma interpolação de valores energéticos a partir de dados dos parâmetros das ondas provenientes de outra fonte. Deste modo será possível concluir sobre a precisão da estimativa energética que será feita.

A zona costeira portuguesa onde vai ser feito o estudo será ao longo do Canhão da Nazaré, em duas localizações diferentes, uma ao largo da costa e outra perto da costa, para se poder verificar a influência da profundidade no potencial energético.

Os resultados obtidos nesta dissertação pode servir de *input* a uma segunda fase de estudo deste recurso, onde se quantifica a energia presente nas ondas que é possível converter em energia elétrica através de diferentes dispositivos de conversão, tendo em conta as matrizes de energia disponível no recurso.

Para que seja possível fazer este estudo, é necessário antes fazer uma revisão bibliográfica das metodologias e tecnologias (capítulo 2) que são utilizadas para estimar a quantidade de energia presente num local.

---

<sup>1</sup>Marine Environment and Technology Centre: [www.maretec.org](http://www.maretec.org)

### 1.3 Contribuições Originais

O trabalho proposto nesta dissertação é desenvolvido no âmbito do projeto *Big Data Ocean*<sup>2</sup>, do programa Horizonte 2020, cujo o objetivo é desenvolver uma plataforma com diferentes tipos de dados marítimos devidamente validados, de forma a servir diferentes propósitos.

Desta forma, os resultados obtidos nesta dissertação contribuíram para a realização do artigo "*A Methodology for Assessing the Impact of the Interannual Variability of Wave Energy Resource on Electrical Energy Conversion*" apresentado na conferência internacional SEST (*Smart Energy Systems and Technologies*) 2018 com a parceria da R&D Nester e a FCT-UNL.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

No presente capítulo é feito um enquadramento do tema de conversão de energia das ondas. Para além das razões que motivam esta dissertação, são também descritos os objetivos delineados do estudo a ser realizado.

No Capítulo 2 desta dissertação é feito um levantamento da técnicas de caracterização da energia disponível nas ondas do mar, referindo quais são os métodos utilizados para extrair informação dos estados físicos do mar, bem como os modelos de ondas existentes para validar essa informação.

No Capítulo 3 é introduzido o caso de estudo que motiva esta dissertação, fazendo a descrição das metodologias utilizadas no levantamento e processamento dos dados retirados da plataforma do MARETEC relativos ao local de estudo.

A análise e interpretação dos resultados obtidos no capítulo anterior constituem o Capítulo 4, onde é possível concluir sobre o comportamento anual, sazonal e espacial dos estados do mar no local de interesse.

No Capítulo 5 é descrita a metodologia utilizada para calcular valores energéticos das localizações de interesse a partir de dados provenientes de outra fonte, de forma a validar as estimativas resultantes do capítulo 4.

Por fim, no Capítulo 6 são feitas as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido no caso de estudo, analisando perspetivas para trabalhos futuros relacionados com área de energia das ondas.

---

<sup>2</sup>*Big Data Ocean*: [www.bigdataocean.eu/site/](http://www.bigdataocean.eu/site/)



## ESTADO DA ARTE

## 2.1 Introdução

O potencial energético presente nas ondas pode ser estimado teoricamente, tendo em conta todos os fatores que afetam a natureza do local em questão. De uma forma teórica, a disponibilidade presente neste recurso foi estudada por Seymor e Isaacs [1] (1973), estimando a densidade média anual de potência a nível global na ordem de 1-10 TW (*teraWatt*), o que representava a mesma ordem de potência elétrica média anual consumida no mundo. Para poder aproveitar esse potencial é necessário enfrentar algumas barreiras que constituem grandes entraves no desenvolvimento e crescimento da energia das ondas como uma indústria. O problema da sobrevivência e manutenção do material utilizado e o problema de transporte de energia pelo mar, entre outros, são algumas das barreiras a ter em conta.

Nesta revisão bibliográfica é importante juntar toda a informação necessária para que seja possível fazer a caracterização e avaliação do recurso existente no local de estudo. Para que isso aconteça, é necessário rever alguns conceitos teóricos como a análise de uma onda no domínio temporal e no domínio da frequência. Para além disso, é fundamental saber que tipo de dispositivos marítimos são utilizados na recolha de dados e os princípios de funcionamento por que estes se regem. Tendo em conta os dados recolhidos pelos dispositivos marítimos, é importante saber como os modelos numéricos que simulam as condições marítimas podem complementar e validar essa informação. Para além da obtenção de de informação relativa aos estados do mar, são revistas algumas metodologias para estimar potência por frente de onda a partir desses dados.

## 2.2 Caracterização das Ondas e Fundamentos Teóricos

O conhecimento e estudo de toda a hidrodinâmica associada a uma onda é fundamental para se saber quantificar a energia presente nela. As ondas oceânicas são um sistema oscilatório no qual as partículas de água têm um movimento orbital [2]. Quanto menor é a profundidade, maior é o atrito existente com o fundo oceânico e menor é a energia que as partículas transportam, e portanto, menor é a oscilação em águas pouco profundas. Na verdade, em águas pouco profundas as partículas assumem um movimento orbital elíptico, cada vez mais largo até chegar ao fundo, enquanto que em águas profundas as partículas mantêm sempre um movimento circular. A figura 2.1 é representativa destes fenômenos, onde a variável  $u$  define o movimento horizontal das partículas de água,  $z$  define o movimento vertical,  $d$  a distância ao fundo do mar e  $L$  o comprimento de onda.  $A$  e  $B$  representam a largura e altura de uma elipse, que no caso de órbitas circulares têm o mesmo valor.

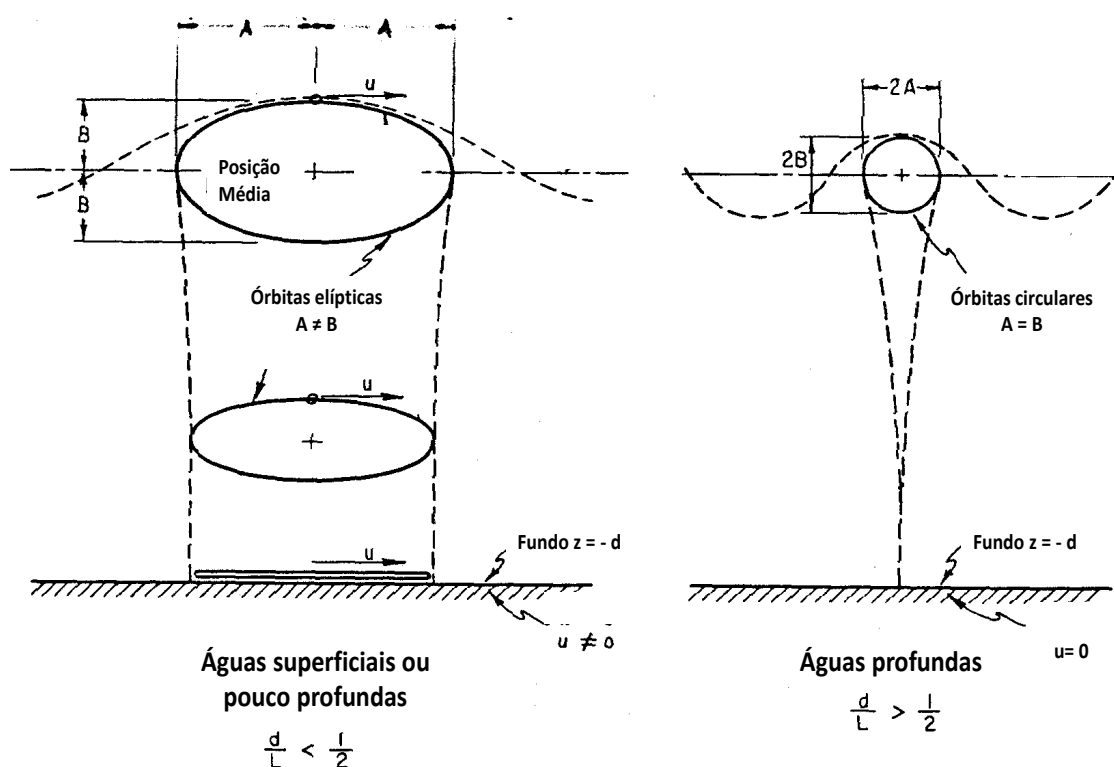


Figura 2.1: Movimento assumido pelas partículas de água em baixa e alta profundidade (adaptado de [3]).

### 2.2.1 Teoria Linear das Ondas

Foi já depois de Masuda, McCormick e Stephen Salter [4] terem dado o seu contributo ao desenvolvimento da tecnologia de conversão de energia das ondas que no Japão e na Noruega se começaram a desenvolver teorias relacionadas com a hidrodinâmica das ondas.



A maior parte destas teorias são baseadas na Teoria Linear das Ondas, que caracteriza ondas oceânicas de superfície, relacionando todas as forças e energia associadas à sua formação e transporte.

### 2.2.1.1 Movimento Linear das Ondas

Uma onda marítima pode ser matematicamente descrita como uma função sinusoidal (*seno* ou *coseno*). As propriedades que caracterizam uma onda sinusoidal são a sua amplitude  $a$  (em metro), o seu comprimento de onda  $\lambda$  (em metro) que representa a distância entre máximos consecutivos, o período  $T$  (em segundos) e, por definição, o seu inverso, a frequência da onda  $f$  (em hertz).

Uma onda monocromática caracteriza-se por ter uma frequência e amplitude constantes ao longo do tempo. Desta forma, a superfície de ondulação marítima pode ser representada como a soma de diversas ondas monocromáticas, cada uma com amplitude, comprimento de onda, frequência e período diferentes. Tendo ainda em conta as variáveis direcional e temporal, as ondas têm, também, que ser caracterizadas quanto à direção de propagação e fase de cada onda monocromática.

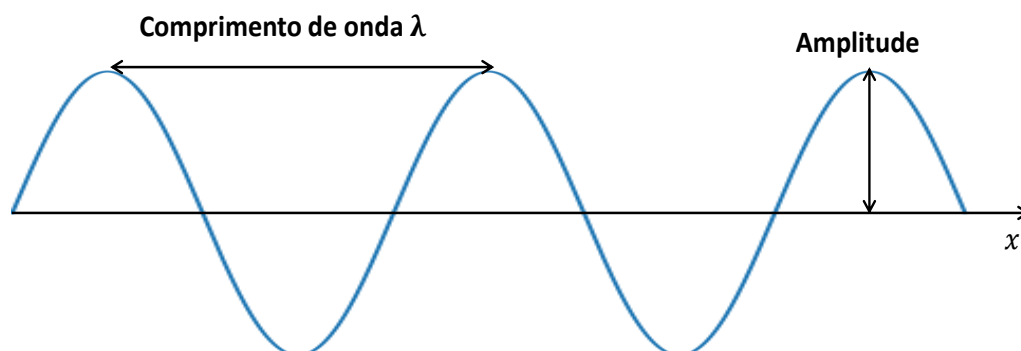


Figura 2.2: Onda sinusoidal monocromática.

Segundo a Teoria Linear das Ondas [5], o movimento linearizado de propagação das ondas, onde se assume que o fluido é incompressível, não viscoso e homogêneo e que o seu escoamento tem rotacional nulo, pode ser descrito segundo a seguinte função matemática,

$$\eta = a \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \alpha\right) \quad (2.1)$$

onde a primeira variável,  $t$ , representa o tempo e a segunda variável,  $x$  representa a posição no espaço na direção de propagação da onda. O parâmetro,  $a$  representa a amplitude da onda e  $\alpha$  representa o termo de fase (desfasamento angular em radianos). É possível ainda simplificar a função tendo em conta que a expressão  $\frac{2\pi}{T}$  representa a frequência angular  $\omega$ , medida em  $rad/s$  e que a expressão  $\frac{2\pi}{\lambda}$  representa o número da onda  $k$ , medido em  $rad/m$ , resultando na seguinte expressão para o movimento linearizado das ondas.

$$\eta = a \sin(\omega t - kx + \alpha) \quad (2.2)$$

A velocidade de fase é outra característica associada a uma onda que relaciona o tempo que uma partícula demora a percorrer dois pontos com a mesma amplitude, de maneira a que  $\omega t_1 + kx_1 = \omega t_2 + kx_2$ . Na equação 2.3 é possível verificar a relação entre a fase do ponto 1 e a fase do ponto 2 para definir a velocidade de fase  $C_p$ .

$$\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = C_p \quad (2.3)$$

A relação de dispersão relaciona o número de onda  $k$  e a frequência de uma onda representada por 2.2. Esta relação pode ser dada por  $\omega = \pm \sqrt{gk \tanh(kh)}$  [5]. Substituindo  $\omega$  na equação 2.3 é possível definir a velocidade de fase em função da aceleração da gravidade, profundidade ao fundo do mar e do número de onda, sendo  $C_p = \frac{\sqrt{gk \tanh(kh)}}{k}$ . Na tabela 2.1 estão representadas as expressões que a velocidade de fase assume, de acordo com a distância ao fundo do mar  $h$ , em metros. É de realçar, que para profundidades baixas,  $\tanh(kh)$  assume a expressão  $kh$  e para profundidades altas assume o valor unitário.

Alta ( $h > \frac{1}{2}\lambda$ )	Baixa ( $h < \frac{1}{20}\lambda$ )	Intermédia ( $\frac{1}{20}\lambda < h < \frac{1}{2}\lambda$ )
$C_p = \sqrt{\frac{g}{k}}$	$C_p = \sqrt{gh}$	$C_p = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)}$

Tabela 2.1: Velocidade de fase consoante a profundidade do mar.

Em primeiro lugar é possível concluir que em zonas de grande profundidade a velocidade de fase deixa de ser afetada pela distância ao fundo do mar, sendo apenas afetada pelo número da onda,  $k$  e da aceleração devido à gravidade,  $g$ . Em baixa profundidade, a velocidade de fase passa a depender da aceleração da gravidade,  $g$  e da distância ao fundo do mar,  $h$ . Numa situação intermédia, em que a profundidade varia entre metade do comprimento de onda e um vigésimo do comprimento de onda, a velocidade de fase depende de todas estes fatores: aceleração da gravidade, número de onda e profundidade.

### 2.2.1.2 Equações para a velocidade da onda

Uma vez descrito matematicamente o movimento básico das ondas, é possível ter em conta os estudos levados a cabo ainda no século XVIII e XIX, onde matemáticos como Newton, Laplace, Lagrange, Euler, entre outros, deram o seu contributo para os avanços na Teoria Linear das Ondas. Uns anos depois (1788), Joseph-Louis Lagrange derivou as equações lineares para ondas de pequena amplitude, limitado para o caso de ondas planas em profundidade baixa [6].

Existe uma dificuldade em caracterizar o período e comprimento de onda em função da aceleração da gravidade, profundidade do mar, entre outras [5], uma vez que o mar é afetado por inúmeros fatores externos e a única maneira de se chegar a conclusões é limitando as características do mar, como sendo um canal com paredes paralelas e fundo horizontal onde se assume que não há variação do movimento da água ao longo do canal.

Tendo em conta estas limitações das características do mar, é possível analisar as equações da hidrodinâmica para ondas superficiais, definindo dois eixos, em que o eixo vertical,  $z$ , representa a componente vertical do movimento da onda e o eixo horizontal,  $x$ , representa a direção de propagação da onda, como é possível verificar na figura 2.3. O valor de  $\eta(x, t)$  ao longo do tempo e do espaço é, então, o valor de  $z$  (em metros) nesse determinado instante, tendo como referência que zero é o nível médio do mar, e que este valor tanto pode ser positivo ou negativo. O valor de  $z$ , neste caso, descreve a altura que em determinado momento a onda assume.

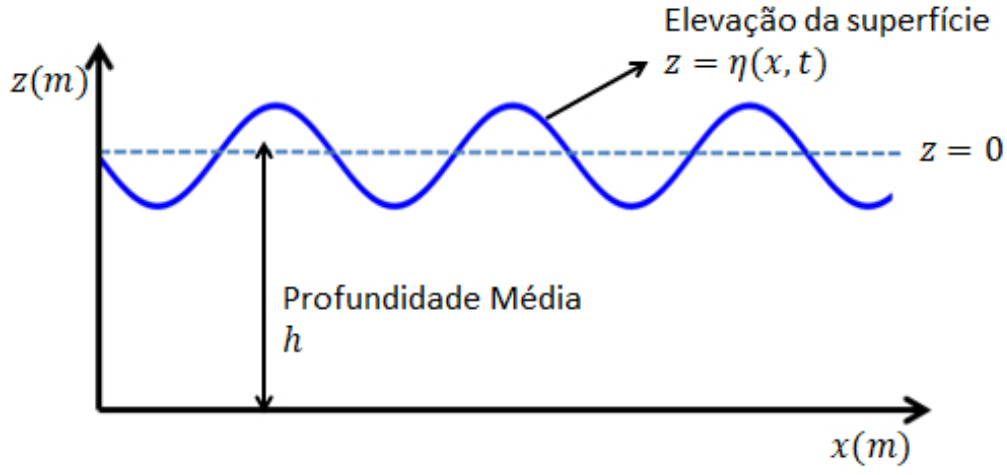


Figura 2.3: Representação espacial de uma onda.

A velocidade com que uma onda se propaga pode ser calculada tendo em conta a sua componente vertical e a sua componente horizontal a cada ponto do espaço. Desta forma, podemos definir que a velocidade de uma onda é dada pela soma da sua componente vertical,  $u$  e horizontal,  $w$  (cada uma função do espaço e do tempo), uma vez que a velocidade é uma grandeza vetorial.

$$\vec{v}(x, z, t) = \vec{u}(x, z, t) + \vec{w}(x, z, t) \quad (2.4)$$

Como já foi dito anteriormente, assume-se que não há variação do movimento da água dentro do canal e, por essa razão, não se considera um sistema de eixos a três dimensões, assumindo que a componente da velocidade da onda no terceiro eixo é zero.

O potencial de velocidades é uma grandeza, representada por  $\phi$ , que caracteriza cada componente da velocidade de qualquer fluido da seguinte maneira,

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ w &= \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde  $u$  representa a componente horizontal da velocidade do fluido e  $w$  a componente vertical. Para que se possa aplicar esta fórmula assume-se que o fluido apresenta rotacional nulo e não é possível de se comprimir.

Aplicando o potencial de velocidade à *equação da continuidade*,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

podemos definir o movimento interno das ondas do mar, substituindo a componente vertical e horizontal da velocidade da água,  $w$  e  $u$ , na mesma, obtendo a *equação de Laplace*, que tem de obedecer à igualdade representada na equação (2.7).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.7)$$

Uma vez descrito o movimento interno das ondas do mar, podemos definir o movimento destas em condições de fronteira:

- No fundo do mar assume-se que não existe permeabilidade à água, impedindo que as ondas se desloquem para cima e, portanto, conclui-se que a componente vertical da velocidade da água é nula ao longo do tempo [5].
- À superfície, as ondas adquirem certo movimento dependendo das condições ambientais num determinado período. Existem formulações matemáticas que descrevem o movimento de uma partícula à superfície do mar que não serão abordadas nesta revisão, uma vez que não constituem um interesse maior para o objetivo do trabalho a ser desenvolvido.

Concluindo sobre o movimento linear das ondas, é possível afirmar que estas possuem três tipos de movimentos: **no interior do mar**, (onde a velocidade do fluido tem de obedecer à *equação de Laplace*), **no fundo do mar** e **à superfície**.

### 2.2.2 Energia Presente no Recurso

A energia presente nas ondas marítimas é difícil de se quantificar, na medida em que o movimento oscilatório presente na ondulação marítima é contínuo ao longo do tempo. Desta forma, apenas é possível quantificar a energia que realmente interessa para extração. Para isso, interessa saber qual a energia presente por unidade de superfície.

#### 2.2.2.1 Energia Potencial

Analisando a figura 2.4,  $V$  representa a energia potencial presente numa quantidade de fluido com determinada massa que se movimenta verticalmente de  $-z$  a  $z$  ( $2z$  em termos de distancia). Uma vez que uma partícula de água com determinada massa assume um movimento circular dentro do mar, podemos quantificar a energia potencial presente numa coluna de água com secção  $dA$  através da equação 2.8.

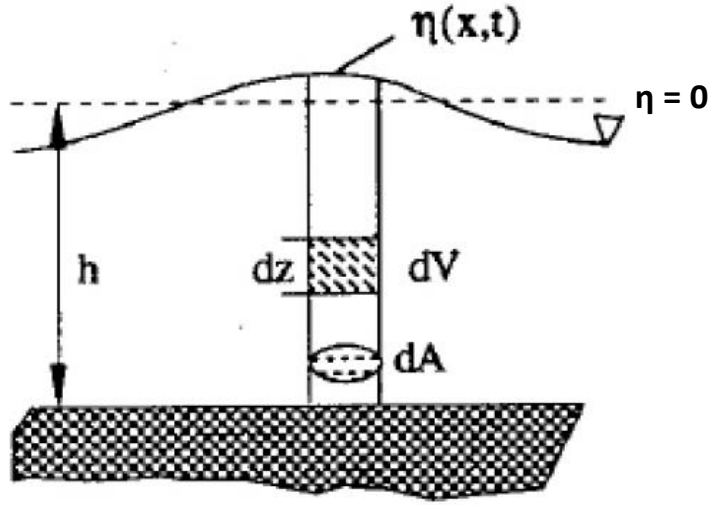


Figura 2.4: Caracterização da energia potencial presente por secção de área numa coluna de água (adaptada de [5]).

$$\begin{aligned}
 \frac{dE_p}{dA} &= \int_{z=-h}^{\eta} (\rho g z) dz \\
 &= \rho g \int_{z=-h}^{\eta} z dz = \rho g \left[ \frac{z^2}{2} \right]_{-h}^{\eta} \\
 &= \rho g \left( \frac{\eta^2 - h^2}{2} \right)
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

A integração é feita desde a coordenada  $z = -h$  até ao valor de  $\eta(x, z) = \sin(kx)$ , omitindo o fator temporal que neste caso é irrelevante. A este valor é necessário subtrair a parte de energia que corresponde ao valor médio do movimento da onda, em que  $\eta(x, z) = 0$  (representada por  $dE_{p1}$  na equação 2.9), corroborando Harald E.Krogstad e Oivind A. Arnsten, em *Linear Wave Theory, Regular Waves*, onde afirmam que apenas o excesso de energia potencial é de interesse. Assim, podemos definir a energia potencial, por unidade de superfície, presente numa coluna de água da maneira apresentada de seguida.

$$\frac{dE_p}{dA} = \frac{dE_p - dE_{p1}}{dA} = \rho g \left( \frac{\eta^2 - h^2 + h^2}{2} \right) = \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \tag{2.9}$$

Como, em termos quantitativos, é mais fácil calcular a energia potencial utilizando a amplitude máxima da onda registada, é comum fazer uma aproximação da equação do movimento da onda para o valor médio da mesma, ou seja, passa-se a ter  $\eta^2 = \frac{a^2}{2}$ . Assim, temos a caracterização geral da energia potencial média presente numa coluna de água com secção  $dA$ , em  $J/m^2$ .

$$\frac{dE_p}{dA} = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad \left[ \frac{J}{m^2} \right] \tag{2.10}$$

### 2.2.2.2 Energia Cinética

Para além da caracterização da energia potencial é necessário, também, caracterizar a energia cinética presente em condições idênticas. Assumindo que a energia cinética presente numa coluna de água com a mesma secção  $dA$  é dada por,

$$\frac{dE_k}{dA} = \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) dz \quad (2.11)$$

onde se assume que as variáveis  $u$  e  $w$ , já descritas anteriormente, caracterizam as duas componentes da velocidade de onda (não confundindo com  $\omega$  que representa a frequência angular). Assim, tendo em conta que  $(u^2 + w^2) = (\omega a)^2 e^{2kz}$  [5] é possível estimar a energia cinética em função da amplitude da onda e da aceleração da gravidade. A integração é feita assumindo as ondas em águas profundas, ou seja, desde  $h \rightarrow \infty$  até  $\eta$  igual ao seu valor médio.

$$\frac{dE_k}{dA} = \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho (\omega a)^2 e^{2kz} dz = \frac{1}{2} \rho (\omega a)^2 \int_{-\infty}^0 e^{2kz} dz = \frac{\omega^2}{2k} \rho a^2 \frac{1}{2} \quad \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (2.12)$$

Simplificando a expressão da energia cinética média na coluna de água, é possível concluir que este valor é igual à energia potencial média nas mesmas condições. Este resultado acontece devido à constante transferência de energia cinética para energia potencial, conservando-se assim, pelas leis da física, a energia mecânica. Isto não quer dizer que a cada instante a energia cinética é igual à energia potencial, pois isso seria uma forma errada de concluir sobre a transferência e conservação da energia numa onda.

$$\left( \frac{dE_p}{dA} \right)_{med} = \left( \frac{dE_k}{dA} \right)_{med} = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad \left[ \frac{J}{m^2} \right] \quad (2.13)$$

### 2.2.2.3 Estimação da Potência por Frente de Onda

É de salientar que estes cálculos somente se podem aplicar a ondas com apenas uma frequência em que a direção de propagação se mantém constante e, portanto, seria possível concluir que a energia presente na coluna de água é a soma das energias potencial e cinética. Porém, tendo em conta que a energia varia consoante a profundidade existente ao fundo do canal e consoante a quantidade de harmónicas presentes que podem existir, propagando-se em várias direções, é necessário introduzir a influência que a *velocidade de grupo* e a *velocidade de fase* têm no cálculo da energia total presente no recurso. A *velocidade de fase* é um conceito já abordado neste trabalho, que representa a velocidade com que a fase de uma harmónica se desloca no espaço.

Também a energia associada às ondas se desloca com determinada velocidade. Assim, à *velocidade de grupo*,  $c_g$ , chama-se a média ponderada dessas velocidades [7]. Uma vez que esta grandeza depende da profundidade existente, a velocidade com que a energia da onda se desloca não é a mesma com que a fase se desloca no espaço. Com o aumento da profundidade vertical existente, a *velocidade de grupo* diminui relativamente à *velocidade*

de fase, sendo que em águas profundas a velocidade com que a energia se desloca é aproximadamente metade da *velocidade de fase*. Para provar que é verdade, assume-se que  $c_g = \frac{d\omega}{dk}$  e que  $h \rightarrow \infty$ .

$$c_g = \frac{2\omega d\omega}{2\omega dk} = \left( \frac{(g \cdot \tanh(kh) + gk \cdot h \cdot \cosh^{-2}(kh))dk}{2\omega dk} \right)_{h \rightarrow \infty} = \frac{\frac{g}{\omega}}{2} = \frac{c_p}{2} \quad (2.14)$$

Por outro lado, em águas pouco profundas, as duas grandezas assumem o mesmo valor, concluindo que a energia das ondas e a fase das ondas se deslocam com a mesma velocidade. Em águas pouco profundas, a frequência angular  $\omega = \sqrt{gh} \cdot k$  e portanto, derivando em ordem a  $k$ , verifica-se que a *velocidade de fase*  $c_p$  iguala-se à *velocidade de grupo*,  $c_g$ .

$$c_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\sqrt{gh} \cdot k)}{dk} = \sqrt{gh} = c_p \quad (2.15)$$

Em estudos de hidrodinâmica de energia de ondas é habitual caracterizar um local de estudo quanto à potência por frente de onda e, para isso, multiplica-se a *velocidade de grupo* à densidade de energia por área de secção, calculada anteriormente, sendo que o resultado vem em *Watt/metro*. Esta unidade de medida representa a potência por frente de onda  $P_{wave}$ .

$$P_{wave} = \left( \frac{dE_p}{dA} + \frac{dE_k}{dA} \right) c_g = \frac{dE_m}{dA} c_g = \frac{1}{2} \rho g a^2 c_g \quad \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (2.16)$$

## 2.3 Revisão Bibliográfica das Metodologias e Tecnologias Utilizadas na Recolha e Tratamento de Dados

Para que seja possível quantificar a energia presente nas ondas é necessário retirar dados através de medições das características das mesmas. Esta recolha de dados pode ser feita de duas maneiras diferentes que se complementam nas suas aplicações. Nesta secção vão ser abordados os diferentes tipos de dispositivos marítimos existentes utilizados para medições no mar e os modelos numéricos existentes que simulam a geração e propagação de ondas marítimas num determinado período temporal. Na maior parte das vezes é comum fazer uma comparação entre os dados recolhidos por boias marítimas e os dados obtidos através de diferentes modelos numéricos para que haja uma maior precisão na previsão da energia existente no local.

A potência instantânea presente nas ondas é, de modo geral, derivada a partir da altura significativa da onda,  $H_s$  em metros e o período de energia,  $T_e$  em segundos. Os valores destes parâmetros vão constituir as séries de dados relativos ao período temporal em estudo. A altura significativa representa a altura da onda que mais vezes se verificou num determinado período temporal. O período de energia é calculado através do período médio das ondas,  $T_m$  e do período máximo,  $T_p$ . De uma forma geral, em estudos desta natureza, é habitual relacionar o período médio e o máximo através de  $T_p = 1,2T_m$ , e por sua vez, relacionar o período de energia e período máximo através de  $T_e = \alpha T_p$ , onde  $\alpha$  depende da forma do espetro das ondas que é usada para definir cada estado do mar [8].

Em estudos de caracterização do potencial energético presente num local é necessário, também, verificar a qualidade dos dados recolhidos de cada fonte (boias marítimas e modelos numéricos) para estimação do potencial. Os ficheiros de dados de altura significativa e período de energia obtidos através das medições dos instrumentos marítimos são comparados com os dados obtidos dos modelos numéricos através dos índices de qualidade como:

- *bias* - que representa a média da diferença entre as duas fontes de dados;
- *RMSE* - o erro quadrático médio;
- *CC* - o coeficiente de correlação entre ambos;
- *MEAN* - o valor médio registado de cada fonte;
- *MAE* - o valor absoluto do erro entre os valores das duas fontes.

É de referir ainda que no armazenamento de dados é habitual serem utilizados ficheiros *NetCDF* (ver secção 2.3.5) que contêm as séries temporais com os dados recolhidos. Apesar de não ser propriamente uma tecnologia, este tipo de ficheiros constitui um papel importante no armazenamento de dados na medida em que é, em larga escala, utilizado para armazenar dados meteorológicos seja do mar ou atmosfera, e deste modo, bastante utilizados na previsão de estados do mar bem como do vento.



### 2.3.1 Instrumentos de Medição

O tipo de instrumentos utilizados na recolha de dados tem de ser estudado na medida em que é muito importante ter em conta a natureza geofísica bem como as condições ambientais no local de medição e, portanto, é necessário saber quão representativa a medição de um certo instrumento é em relação à área onde é feita a previsão do recurso [9]. Na figura 2.5 é mostrado, genericamente, onde se insere o papel dos instrumentos de medição na estimação do potencial energético de um local. Através dos dados brutos é possível obter os valores de altura significativa e período de energia.

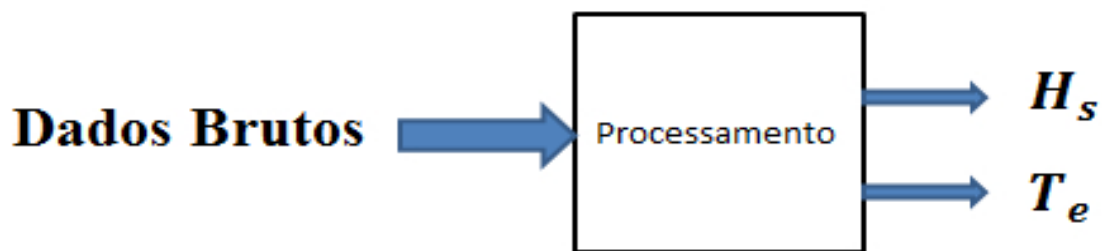


Figura 2.5: Diagrama de recolha e processamento de dados.

Nesta secção são caracterizados cada tipo de instrumentos de medição quanto ao seu princípio de funcionamento, o tipo de dados e em que formato os recolhe, a forma como são recolhidos e a forma como tais instrumentos são amarrados no mar.

#### 2.3.1.1 Boias de superfície

Boias de superfície são dispositivos colocados em águas com profundidade superior a 10 metros e amarrados de forma a corresponderem livremente ao movimento das ondas e estarem a salvo de eventuais condições climáticas adversas. Estes dispositivos podem ser agrupados em duas categorias:

- **Boias em forma de disco** - denominados na língua inglesa como "*pitch-roll-heave buoys*";
- **Boias em forma esférica** - denominados na língua inglesa como "*particle following buoys*".

Ambos os tipos destes instrumentos gravam séries temporais de valores instantâneos do deslocamento, aceleração ou velocidade da boia segundo três eixos diferentes: vertical, norte e este, em relação ao ponto de medição. Estas séries temporais de dados podem ser diretamente deduzidas em termos de altura significativa da onda,  $H_s$ , e período médio da onda,  $T_m$ . Para além desta aplicação, é muito comum, também, utilizar estes dados brutos como *input* para análise espectral, cujos resultados obtidos têm interpretação no domínio da frequência [11] (ver secção 2.3.2).

A recolha de dados pode ser feita segundo três modos diferentes:



Figura 2.6: Boia de superfície multissensor [10].

- transmissão de rádio de alta ou muito alta frequência em tempo real;
- gravação dos dados processados na boia (apenas analisados quando a boia é recolhida);
- um ou vários satélites recolhem e gravam os dados adquiridos.

### 2.3.1.2 ADVP/ADCP (*Acoustic Doppler Velocity/Current Profilers*)

Este tipo de dispositivos têm como objetivo a medição da velocidade e direção das partículas de água numa coluna de água. Para isso, os dispositivos ADVP/ADCP emitem quatro feixes de impulsos acústicos (figura 2.7) de 1 MHz do fundo do mar em direção à superfície. A emissão destes impulsos é repetitiva e constante. Estes sinais são refletidos pelas partículas de água ou em sedimentos superficiais, sendo que apenas uma percentagem destes chegam novamente ao dispositivo. Através do sinal recebido é possível verificar o efeito de Doppler. Este efeito consiste na mudança na frequência do impulso acústico causado pelo movimento relativo entre a fonte das ondas marítimas e o observador (de onde são enviados e recebidos os impulsos). Uma vez que a fonte das ondas se move em determinadas direções, a frequência com que o sinal chega ao observador varia em relação à frequência do sinal enviado, o que permite que seja calculada a velocidade e direção de propagação das ondas. Admitindo que a posição de onde o sinal é enviado e recebido é estacionária, é possível determinar a direção de propagação das partículas que se movimentam com a massa de água.

No mar, estes dispositivos podem ser amarrados a boias de superfície, fornecendo os dados recolhidos à mesma, de maneira a serem retransmitidos via rádio para um satélite ou para uma estação costeira [9]. Assim, a obtenção de dados é feita quase em tempo real.

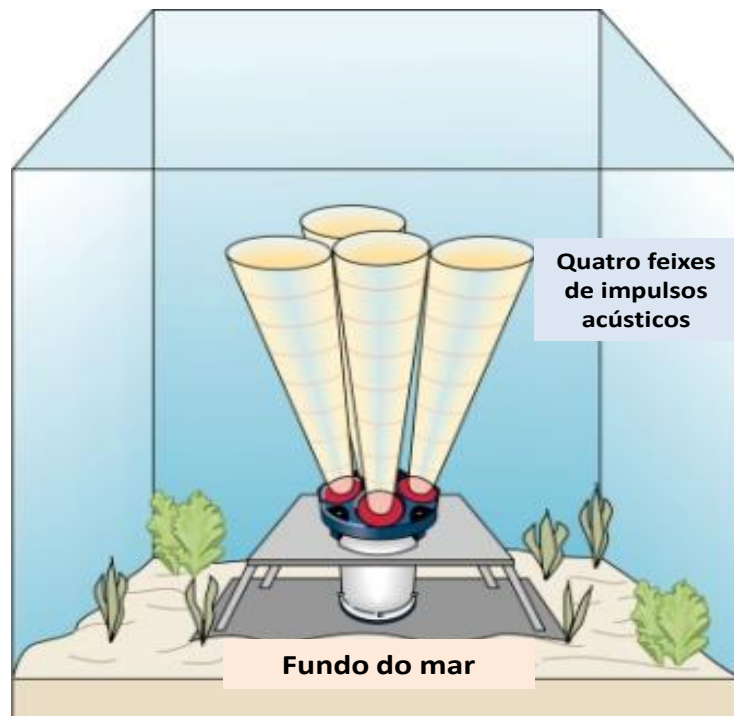


Figura 2.7: Dispositivo ADCP (adaptado de [12]).

#### 2.3.1.3 Sensores de Pressão

Este tipo de sensores apenas são úteis numa zona de medição de baixa profundidade uma vez que as diferenças de pressão são atenuadas com o aumento da profundidade. A pressão hidrostática existente no mar varia constantemente devido à existência de ondas e, por isso, as diferenças de pressão registadas pelos sensores são representativas do estado do mar.

O valor da pressão hidrostática medido é uma função de certas variáveis como a altura,  $h$ , o número da onda,  $k$  e a elevação da superfície da onda,  $\eta$  como é representado na equação 2.17.

$$p = \frac{\eta \rho g}{\cosh(kh)} \quad (2.17)$$

#### 2.3.1.4 Radar HF (*High Frequency*)

Os dispositivos radar de alta frequência são sistemas sensoriais remotos que utilizam transmissores/recetores para enviar sinais entre 2 e 20 MHz para medir o comportamento direcional das ondas e correntes marítimas. O sinal enviado pela antena é refletido nas partículas de água, sendo que esse sinal chega novamente à antena. No sinal recebido na antena do radar é possível observar o espectro de Doppler. Tal como nos dispositivos ADVP/ADVP é a mudança na frequência verificada entre o sinal enviado e o sinal recebido que permite calcular velocidade e direção das ondas. Neste tipo de equipamento, os sinais são enviados e recebidos por uma antena colocada fora de água. Dependendo da frequência de operação do radar, o cálculo da velocidade das ondas pode ser feito desde 10 a 100 km de distância da antena.

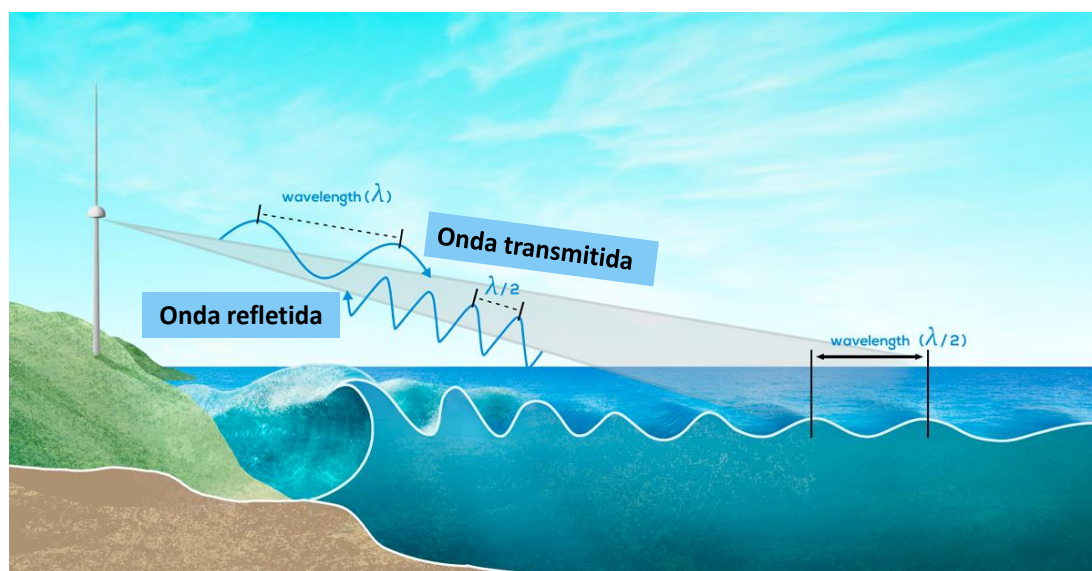


Figura 2.8: Radar de Alta Frequência (adaptado de [13]).

#### 2.3.1.5 Radar Banda-X

Tal como o dispositivo descrito anteriormente, este radar é também ele um sistema sensorial remoto que permite a extração de características das ondas e das correntes marítimas através de sinais de rádio. A utilização de radares diferencia consoante o propósito para que ele existe. Para diferentes aplicações existem radares a funcionarem a frequências diferentes. Os radares de banda-X operam segundo uma largura de banda dos 8 aos 12 GHz e um comprimento de onda de aproximadamente 3 cm. O princípio de funcionamento é semelhante ao de um radar de alta frequência. O objetivo é receber na antena um sinal refletido nas partículas de água, em que nele se encontre a informação das características que são de interesse. Este sinal recebido é resultado das interações do sinal enviado e as ondas existentes. Como a intensidade do sinal recebido é maior quando o comprimento de

onda da ondulação marítima e o comprimento de onda do sinal eletromagnético emitido são semelhantes, o radar de banda-X é uma boa opção para a extração de características das ondas [14]. Desta forma obtém-se resultados com melhor resolução. Ao contrário dos radares de alta frequência que reproduzem resultados com menor resolução, o radar de banda-X tem um curto alcance espacial.

Este tipo de dispositivos são também utilizados para previsão a curto alcance de condições meteorológicas, como a formação de nuvens e precipitação.

### 2.3.2 Análise Espectral

A informação que é possível retirar das ondas do mar pode, também, ser interpretada do ponto de vista espectral. Na secção 2.2 deste capítulo foi descrita a forma como é possível calcular teoricamente a energia presente nas ondas, tendo em conta o movimento básico das ondas. A análise no âmbito da frequência permite saber muito mais em relação à ondulação marítima, uma vez que esta é composta por diversas ondas com diferentes frequências que se propagam em diferentes direções.

Existem modelos espectrais que utilizam dados brutos retirados de instrumentos de medição como as boias de superfície e os processam, concluindo sobre a energia transportada por cada estado do mar de um ponto de vista espectral. Desta maneira, é também possível quantificar a energia presente por secção de área de superfície ondulatória marítima através do seu espectro de variância representado por  $S(f)$  (o espectro em função das frequências), a densidade de massa da água do mar e da aceleração da gravidade, como se verifica na equação 2.18 [15].

$$E = \rho g \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2.18)$$

A análise espectral das ondas consiste em descrever quantitativamente quais são as frequências espectrais que mais contribuem para o transporte e distribuição de energia [15]. O espectro de variância é obtido através da FFT (*Fast Fourier Transform*) do historial de elevação da superfície marítima que pode ser providenciado, como já referido, pelos instrumentos de medição no local.

A análise espectral feita com base nos dados brutos recolhidos pelas boias de superfície é concluída tendo como *output* dados espectrais e dados não espectrais, todos eles importantes na caracterização do comportamento do mar e na avaliação de potencial energético.

Na figura 2.9 estão demonstrados os resultados da análise espectral de um estudo feito na Irlanda com o objetivo de avaliar o potencial energético ao largo da costa irlandesa e norte-americana. Nesta análise é possível ver dois gráficos que correspondem a dois intervalos de altura significativa e período médio. Em cada estado do mar é possível concluir quais são as frequências que transportam maior quantidade de energia, ou seja, onde a densidade do espectro de variância assume um valor mais elevado ( $S(f)$  em  $m^2/Hz$ ).

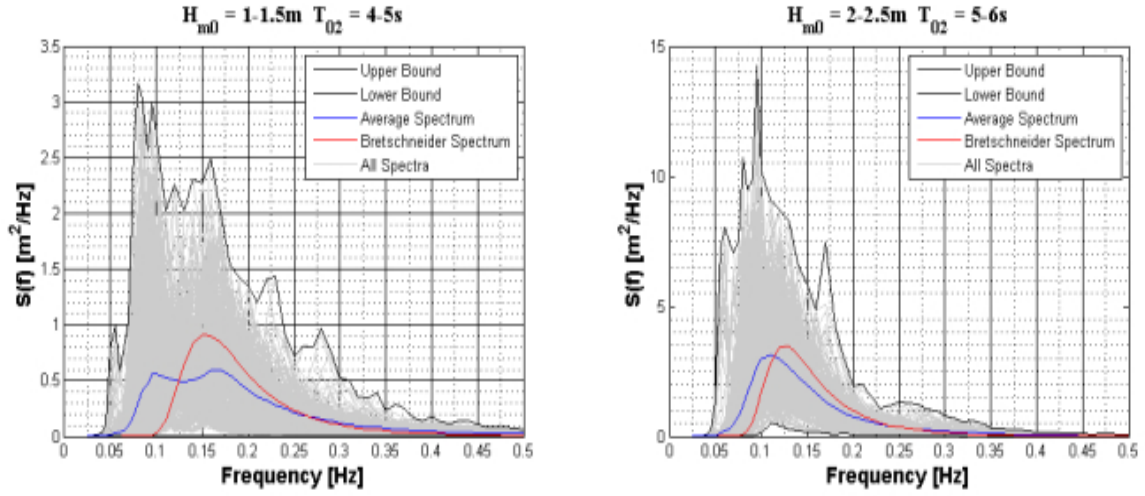


Figura 2.9: Resultados de um caso de estudo realizado na Irlanda [16].

### 2.3.2.1 Dados Espetais

Através da análise espectral feita à superfície ondulatória devem ser recolhidos e gravados um certo número de grandezas de interesse para o estudo do recurso. De entre uma série vasta de dados espectrais que são recolhidos e listados, os mais importantes são:

- Frequência,  $f_i$
- Espectro de Variância da superfície marítima,  $S_i$
- Espectro de Potência,  $P_i$
- Direção Média de Propagação,  $\theta_i$

Para cada frequência listada  $f_i$ , é recolhida também, a densidade de variância da elevação da superfície ondulatória,  $S_i$  (em  $m^2/Hz$ ) para se poder calcular o espectro de potência,  $P_i = \rho g(S_i)c_g(f_i)$ , onde  $\rho, g$  e  $c_g$  representam as grandezas já identificadas anteriormente (densidade da água, aceleração da gravidade e velocidade de grupo, respetivamente). Para cada frequência listada é ainda necessário gravar as harmónicas angulares complexas  $(A_1, B_1, A_2, B_2)_i$  (normalmente são calculadas as duas primeiras harmónicas) retiradas da série de Fourier para poder calcular a direção média de propagação através de:  $(\theta_1)_i = \text{atan2}(B_1, A_1)(2\pi)$  (em radianos).

O espectro de potência é a grandeza que permite saber quantitativamente quais são as frequências que transportam maior quantidade de energia, ou seja, quais são as que têm maior fluxo de potência. A unidade de representação é em kW/m.



### 2.3.2.2 Dados Não Espetraís

É também possível, através de análise espectral, calcular valores de altura significativa e período das ondas que permitem caracterizar os estados do mar. Assim sendo, são calculadas e gravadas diversas grandezas não espectrais, entre as quais estão:

- Momentos espectrais,  $m_n$  - relaciona a densidade do espectro de variância com as diferentes frequências do espectro :  $m_n(f) = \int_{-\infty}^0 f^n S(f) df$ .
- Altura Significativa,  $H_s$  ou  $H_{m0}$ .
- Período de Energia,  $T_e$ .
- Potência Total no Espectro,  $P_{gross}$  (*Gross Power*).

### 2.3.3 Modelos de Ondas

Os modelos de ondas têm o papel de, através de software, simular a geração, propagação e dissipação de ondas em diferentes escalas espaciais dependendo do propósito para que é utilizado. Estes modelos computacionais produzem séries temporais de dados contendo informação sobre todos os estados do mar que são previstos para o local de estudo.

Com os modelos de ondas é possível caracterizar o potencial energético de um local, na medida em que são estimados todos os estados do mar que ocorrem no local de interesse e cada estado do mar tem associado uma determinada energia. A energia associada a cada estado do mar pode ser derivada diretamente das series temporais que contêm informação das ondas. A utilização de modelos de ondas pode ser ainda combinado com dados retirados de instrumentos de medição, permitindo assim uma estimação mais precisa dos estados do mar e consequentemente, ajudará a concluir sobre a viabilidade de introdução de uma instalação de conversores de energia das ondas.

Nesta secção são apresentados alguns modelos de ondas globais e locais dirigidos por agências meteorológicas que providenciam previsões de estados do mar para operações marinhas [9]. Estes modelos são utilizados por outras empresas inseridas em diferentes projetos incidentes na caracterização do potencial energético em diferentes locais.

#### 2.3.3.1 Modelo WAVEWATCH

O modelo WAVEWATCH III é um modelo de terceira geração que simula computacionalmente através de métodos numéricos a geração, propagação e dissipação de ondas. Este modelo foi desenvolvido por Hendrik Tolman no NCEP-NOAA (NCEP-*National Centres for Environmental Prediction*, NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), dando sequência aos modelos desenvolvidos também por ele, o WAVEWATCH E O WAVEWATCH II.

A informação contida nas ondas oceânicas está presente na densidade de energia das mesmas,  $E(\omega, \theta)$ , onde  $\omega$  representa as frequências angulares por onde é distribuída a

energia e  $\theta$  representa a direção de propagação das mesmas. Genericamente, o modelo calcula a evolução da equação de ação de equilíbrio da densidade de energia,  $N = \frac{E}{\omega} = N(x, y, t, \omega, \theta)$ . Esta evolução é descrita pela equação 2.19 [17].

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \omega} (c_\omega N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\omega} \quad (2.19)$$

Na equação descrita,  $S_{tot}$  representa os termos de entrada que são introduzidos no modelo,  $x$  e  $y$  representam coordenadas dos eixos horizontal e vertical,  $\omega$  representa a frequência angular e  $\theta$  a direção de propagação das ondas. O primeiro termo da equação representa a taxa de variação da densidade de energia em ordem ao tempo enquanto que o ponto nas restantes variáveis indica a velocidade de propagação de  $N$  em  $x$ ,  $y$ ,  $\omega$  e  $\theta$  [17].

Os termos de origem são todos os processos físicos que geram, dissipam e distribuem a energia das ondas:

- Parametrizações do vento;
- Dissipação das ondas;
- Variação da profundidade;
- Interações não lineares;
- Atrito com o fundo oceânico;
- Interação entre ondas e gelo;
- Reflexão das ondas.

Sendo assim, é possível definir a variável  $S_{tot}$ , pela equação 2.20. Como saída do modelo, este providencia as séries temporais dos parâmetros das ondas como a altura significativa, período, direção, frequência e o espectro das ondas e ainda secções separadas de informação para tratamento de determinadas localizações.

$$S_{tot} = S_{vento} + S_{diss} + S_{nl} + S_{prof} + S_{fric} + S_{int} + S_{ref} \quad (2.20)$$

### 2.3.3.2 Modelo WAM

O modelo WAM é um modelo de terceira geração implementado e desenvolvido pelo WAMDI (*Wave Model Development and Implementation Group*). Também o Centro Europeu de Previsão Meteorológica para Médio Alcance (ECMWF-*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) usa e desenvolve o modelo WAM juntamente com o modelo atmosférico, de forma a relacionar o parâmetro *Charnock* que determina a severidade da superfície oceânica [18].

O modelo prevê o espectro direcional das ondas bem como as propriedades físicas como altura significativa média, período médio e frequência. O modelo recebe como



entrada três funções, relativas ao vento, características não lineares e dissipação das ondas, calculando uma equação de transporte que descreve a evolução do espectro bidimensional [19].

O projeto WERATLAS da União Europeia utilizou o modelo WAM para obter dados entre 1987 e 1994, criando um atlas contendo a caracterização do recurso energético das ondas em diferentes localizações na Europa.

O NATL (*North Atlantic 50-year Hincast*) foi um projeto levado a cabo pela CRBE (*Climate Research Branch of Environment Canada*) que consistiu na reavaliação dos efeitos das tempestades tropicais [20] que afetam o recurso energético no norte do Atlântico junto ao Canadá. Este projeto utilizou um modelo da OWI (*Ocean Weather Inc*) baseado no modelo WAM. O estudo incidiu sobre o período temporal entre 1954 e 2004. O modelo utilizado disponibilizou as séries temporais dos parâmetros das ondas e do vento (velocidade do vento e das ondas, altura máxima e significativa das ondas e período das ondas), tabelas de percentagem de ocorrências dos diferentes estados do mar e ainda o espectro direcional das ondas.

#### 2.3.3.3 Modelo do UK Met Office

O serviço nacional de meteorologia do Reino Unido, *United Kingdom Meteorological Office*, utiliza diversos modelos numéricos e computacionais para previsões meteorológicas. Para previsões das condições marítimas, o UKMO utiliza um modelo configurado com base no modelo WAVEWATCH III.

O modelo da UKMO foi utilizado em diferentes projetos, entre os quais na caracterização do potencial energético em toda a costa do Reino Unido. Este estudo foi publicado pelo DTI (*Department of Trade and Industry*), num atlas contendo os mapas de energia média anual e sazonal. Estes resultados foram deduzidos utilizando o modelo em questão que simulou os estados do mar em intervalos de seis horas em diferentes zonas representadas numa grelha espaçada a cada doze quilómetros, durante o período de aproximadamente três anos, entre 2000 e 2003. [9]

Em 2004 foi feito um estudo da mesma natureza, financiado pela SWRDA (*South West of England Region Development Agency*), visando a caracterização do potencial energético relativamente às ondas e às marés (energia maremotriz) ao largo da zona sudoeste da costa inglesa [9]. O estudo foi feito tendo em conta dados provenientes de onze localizações, sendo quatro delas deduzidas através do modelo do Serviço Nacional de Meteorologia do Reino Unido (UKMO).

Apesar dos inúmeros projetos e estudos feitos utilizando este modelo de previsão dos estados do mar, a *Met Office* continua a desenvolver os seus modelos, nomeadamente para melhorar a qualidade dos resultados na propagação das ondas, em alta profundidade para baixa profundidade, tendo em conta que existe uma enorme diferença entre o potencial energético em alto mar e na zona costeira. Para além disso, as equipas de previsão

atmosférica interagem com as equipas de previsão marítima a fim de perceber que técnicas e métodos de validação utilizados em ciência atmosférica podem ser aplicados nos modelos de ondas [21]. Desta forma são criados mecanismos de relação entre a previsão das condições atmosféricas e marítimas.

### 2.3.4 O programa *Copernicus*

O *Copernicus* é um programa europeu de monitorização e observação da Terra, que juntamente com o *Galileo* providenciam informação baseada em satélites e medições *in situ* à União Europeia [22]. O Serviço de Monitorização do Ambiente Marinho *Copernicus* (CMEMS- *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) faz parte do Programa *Copernicus* gerido pela União Europeia (UE), que disponibiliza toda a informação relativa aos estados do mar em diversas localizações a nível global numa plataforma *online*.

Nesta plataforma, os produtos disponibilizados providenciam dados dos atuais estados do mar, bem como dados previstos para determinadas datas em determinadas localizações. Formalmente, este serviço disponibiliza mapas de previsão das condições oceânicas, caracterização dos estados atuais do mar para propósitos de pesquisa e desenvolvimento, simulações dos estados físicos do mar e a caracterização das condições de fronteira para a utilização de modelos locais [23] (utilizados juntos à zona costeira).

O CMEMS utiliza duas fontes para recolha de dados:

- Observação Espacial por Satélites;
- Observação por Recolha de Dados no Local.

A observação Espacial por satélites consiste na recolha de imagens de radar para propósitos de diferentes naturezas. Os satélites *Sentinel-3* providenciam dados medidos por radar de altímetro, tendo como objetivo a medição do nível do mar. Um satélite de altímetro como os *Sentinel*, medem o tempo que um sinal de radar leva a percorrer a distância ao nível do mar e a voltar [24], de forma a caracterizar a altura da superfície do mar.

A observação por recolha de dados no local (*in situ*) consiste, entre outras, na medição de características oceânicas por boias de superfície, já referidas neste capítulo. Para além de recolherem informação relativa às condições do estado do mar como a altura significativa, período e direção, recolhem também informação relativa a temperatura, salinidade e velocidade das correntes. Para além da recolha de dados, o CMEMS disponibiliza informação proveniente de modelos de ondas operados por diversos centros de meteorologia.

Em estudos de natureza de caracterização do potencial energético de um local, é comum validar os resultados obtidos pelos satélites com os dados recolhidos pela boias de superfície ou até mesmo com modelos numéricos. Os coeficientes de correlação entre cada tipo de dados indicam a qualidade de medição e previsão dos mesmos.

### 2.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DAS METODOLOGIAS E TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA RECOLHA E TRATAMENTO DE DADOS

Para além deste serviço, o programa *Copernicus* também presta serviço de monitorização terrestre e atmosférica, visando a segurança, sobretudo podendo atuar em casos emergência, nomeadamente no caso de eventos naturais que possam ocorrer como tempestades, entre outros. Na figura 2.10 estão representados todos os serviços que o *Copernicus* disponibiliza.

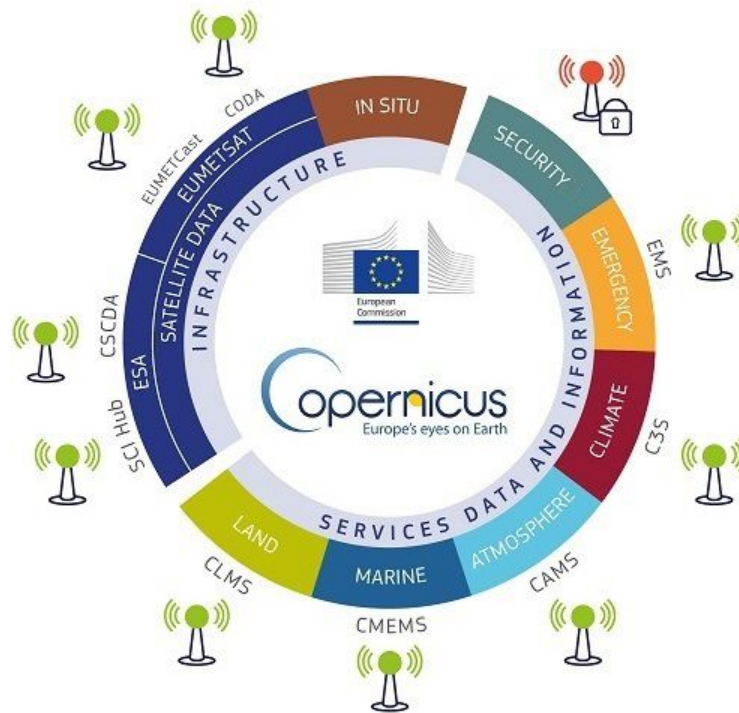


Figura 2.10: Mapa de serviços disponibilizados pelo CMEMS [25].

#### 2.3.5 Ficheiros NetCDF

A NetCDF, *Network Common Data Form*, é um formato de dados utilizado, essencialmente, para armazenamento e manipulação de dados meteorológicos. A NetCDF foi desenvolvida no Programa *Unidata*, que procura o desenvolvimento de processamento de dados através de software, gerida pela UCAR (*University Consortium for Atmospheric Research*) [26].

Uma vez descritas as principais formas de recolher dados relativos aos estados do mar, uma importante etapa neste processo de caracterização é o armazenamento e manipulação dessa informação recolhida. A informação tem de ser armazenada de forma a ser simples e eficiente a sua utilização e de maneira a que todos possam ter acesso. Por vezes, quando a informação é recolhida e armazenada no local (ou por modelos), os ficheiros são enviados para diferentes estações que utilizam arquiteturas computacionais diferentes e, por isso, é vantajoso utilizar ficheiros com formatos abrangentes a todos. Neste caso, os ficheiros NetCDF são codificados e representados em XDR (*eXternal Data Representation*) e, uma

vez que quase todas as arquiteturas têm implementado o XDR, é possível a todas as estruturas o acesso a este tipo de dados [26].

Para além de serem acessíveis à maioria, os ficheiros NetCDF permitem também, a manipulação eficiente dos dados que contêm, na medida em que os ficheiros podem conter uma grande quantidade de informação mas permitem que sejam retiradas apenas secções conforme as necessidades dos utilizadores. Uma outra vantagem para os utilizadores reside no facto de estes não necessitarem de perceber o conteúdo das representações XDR, podendo apenas aceder a dimensões, variáveis e atributos.

Neste caso de estudo, utilizarei a linguagem de programação *Python* para ler e analisar ficheiros NetCDF que contêm dados relativos às propriedades físicas das ondas no local de estudo.

## LEVANTAMENTO DE DADOS E METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é introduzido o caso de estudo que motiva esta dissertação, especificando tanto o local de interesse bem como os dados que servirão de *input* ao estudo. Assim, toda a metodologia aplicada tem como objetivo agrupar um conjunto de resultados que seja representativo do potencial energético do local.

Sob o ponto de vista experimental, neste capítulo é descrita a forma como é extraída a informação relevante a partir da informação total existente. Desta forma, todos os resultados que são objeto de análise são provenientes da aplicação das técnicas de organização e processamento dos dados explicitados neste capítulo.

As técnicas de organização e processamento de dados são realizadas com auxílio do *Python*, que é uma linguagem de programação orientada para muitas áreas, entre as quais, áreas de Tecnologias de Informação, *machine learning* e análise de dados. Dos diversos pacotes disponibilizados, o pacote *pandas*<sup>3</sup> contém bibliotecas de funções orientadas para a modelação e análise de dados em *data frames*. Estas *data frames* são tabelas onde cada linha contém os valores de certas variáveis representadas pelas colunas. Por esta razão, todo o processamento é realizado com base em *data frames* criadas para armazenar os dados.

---

<sup>3</sup>*Pandas*: [pypi.org/project/pandas/](https://pypi.org/project/pandas/)

### 3.1 Especificações Geográficas do Local de Interesse

#### 3.1.1 Enquadramento do Local

O local de estudo selecionado para esta dissertação é na Nazaré, costa litoral oeste portuguesa. O "canhão da Nazaré", como é vulgarmente designado, consiste numa formação montanhosa no fundo oceânico rochoso junto à costa da Nazaré. Esta característica altera a dinâmica de transporte de partículas entre a zona costeira, onde a profundidade é baixa, para zonas onde a profundidade é maior. A formação montanhosa submarina tem, em toda a sua extensão, cerca de 170 km de comprimento, desde a sua cabeceira junto à costa com 150 m de profundidade até ao início da planície abissal com cerca de 5000 metros de profundidade [27].

Este fundo oceânico montanhoso permite que as ondas ganhem uma dimensão fora do normal, sendo por isso vulgar o acontecimento de estados do mar com características particulares. Por esta razão, este local surge como sendo de enorme potencial energético e daí a necessidade de estudo sobre a viabilidade de introdução de uma central de conversão de energia das ondas nesta zona.

O Observatório do Canhão da Nazaré (Monican) integra a rede de observatórios das zonas costeiras na Europa sob o projeto europeu JERICO-NEXT (H2020-INFRAIA 2014-2015). Este observatório consiste em duas boias de superfície (Monican01 e Monican02), duas estações de monitorização (em Peniche e na Nazaré) e uma estação meteorológica em Ferrel.[28]

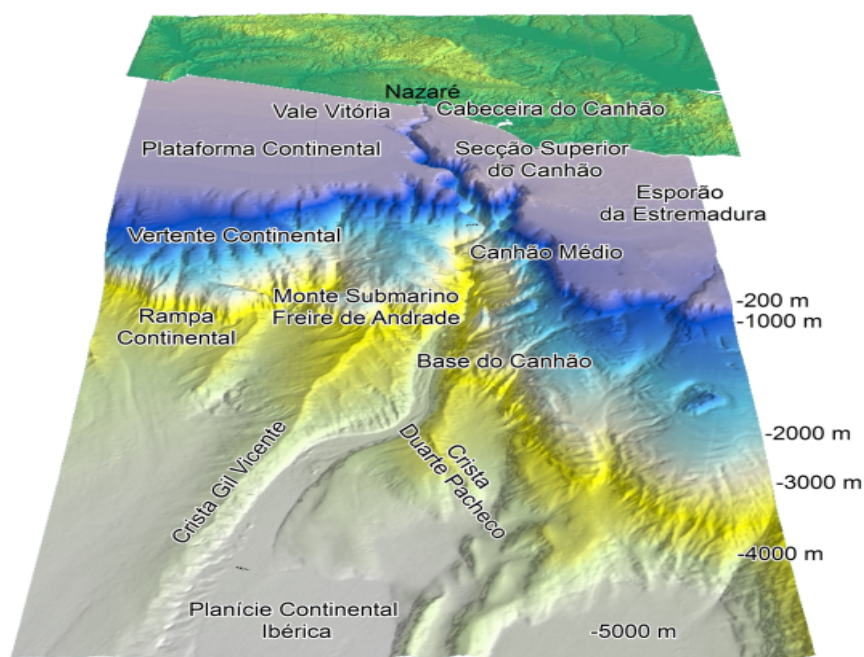


Figura 3.1: Constituição do Canhão da Nazaré [28].



### 3.1.2 Localização das Boias

Este caso de estudo tem como *inputs* dados das características das ondas do mar em duas localizações diferentes. As duas boias utilizadas pertencem ao Observatório do Canhão da Nazaré e são operadas pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa. A diferente localização das boias permite representar a diferença do comportamento das ondas em alto mar (*offshore*) e perto da costa (*nearshore*).

Como mostra a tabela 3.1, a boia Monican01 está localizada a cerca de 49 km da estação de monitorização da Nazaré numa zona com cerca de 2000 metros de profundidade enquanto que a boia Monican02 se encontra a cerca de 11 km da mesma estação numa zona de 90 metros de profundidade. A figura 3.2 permite verificar as coordenadas geográficas de cada boia relacionando com a profundidade do mar e com a distância à estação de monitorização da Nazaré. Os pontos vermelhos assinalados com as letras A, B e C permitem diferenciar as três zonas de profundidade que existem ao longo do Canhão.

Tabela 3.1: Especificações geográficas das boias de superfície.

Boia	Coordenadas	Profundidade (m)	Distância à costa (km)
Monican01	9,6400 Oeste, 39.5100 Norte	2000	48,7
Monican02	9,2100 Oeste, 39.5600 Norte	80	11,4

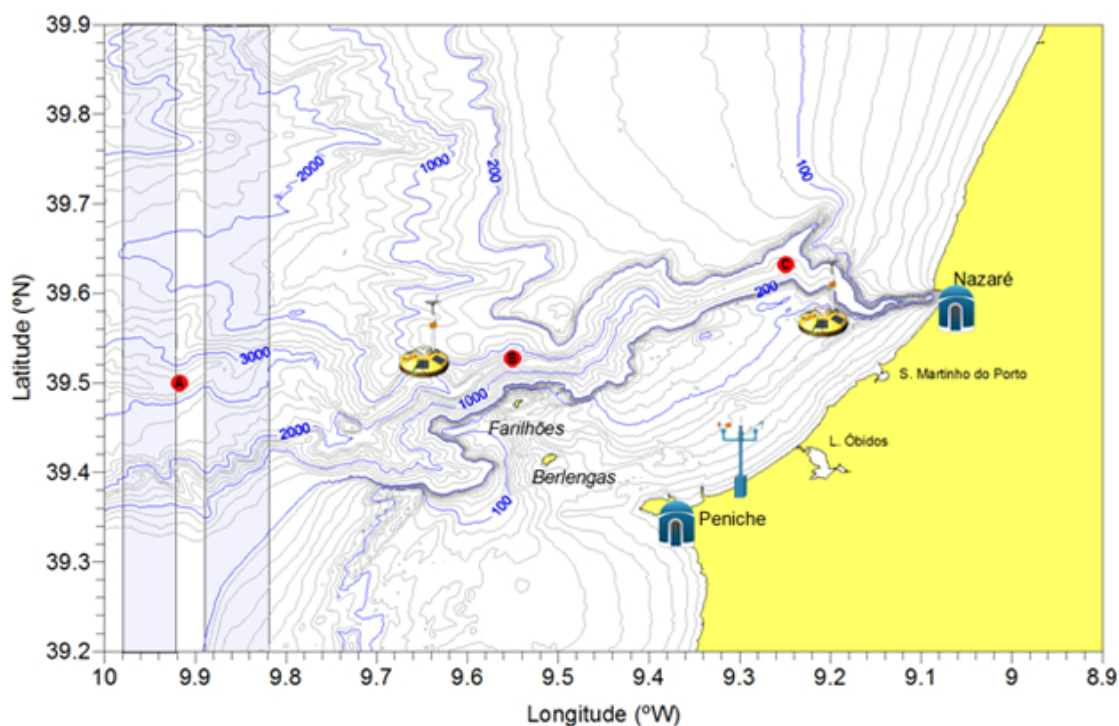


Figura 3.2: Observatório do Canhão da Nazaré [28].

### 3.1.3 Funcionamento das Boias e Recolha de Dados

As duas boias de superfície que constituem o sistema de recolha de dados do Observatório são boias multissensor que fazem medições de parâmetros das ondas, meteorológicos, hidrodinâmicos e das propriedades da água do mar. Cada boia está equipada com diversos tipos de sensores que medem todos os parâmetros. Para além dos sensores, cada boia dispõe de um ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) para a medição da velocidade e direção de propagação das ondas. Os dados recolhidos são de natureza bruta, sendo posteriormente processados e disponibilizados na forma de valores que representam as grandezas da tabela 3.2. A recolha de dados nas boias é feita em intervalos de hora a hora, sendo armazenados em disco no dispositivo e enviados para as estações via rádio ou via satélite.

Tabela 3.2: Tipos de parâmetros medidos pelas boias.

Hidrodinâmicos	Meteorológicos	Água	Ondas
Nível do mar	Temperatura do Ar	Salinidade	Altura Significativa
Vel. de propagação	Precipitação	Oxigénio	Período Médio
	Humidade Relativa	Fitoplâncton	Direção Média
	Radiância Solar	Zooplâncton	Direção Máxima
	Velocidade do Vento	Temperatura	Período Máximo
		Hidrocarbonetos	

Em termos de implementação do trabalho a ser desenvolvido nesta dissertação, não serão utilizados os dados recolhidos pelas boias mas sim dados provenientes de um modelo numérico respetivos a cada localização. O modelo utilizado tem como base o WW3 (ver 2.3.3.1), operado pelo MARETEC (*Marine Environment and Technology Center*), sendo os dados provenientes disponibilizados na sua plataforma *online*. Apesar dos valores estimados não serem reais mas sim simulados, o modelo WW3 é largamente utilizado para estudos desta natureza, tendo sido validado com dados reais e portanto, assume-se como fonte de dados credível para o estudo em causa. Na impossibilidade dos dados reais recolhidos pelas boias estarem disponíveis na plataforma para *download*, surge como opção válida a obtenção dos dados dos modelos das boias para servirem de *input* ao trabalho proposto. À semelhança da recolha dos dados por parte das boias, também os modelos numéricos fazem uma estimativa de valores hora a hora para cada uma das localizações representadas pelas boias.

Na figura 3.3 está representada a página da plataforma *online* com o destaque às duas localizações sobre o qual incide o estudo. Todos os parâmetros hidrodinâmicos são estimados com base no modelo Mohid enquanto que os parâmetros das ondas são estimados com base no modelo WAVEWATCH III.



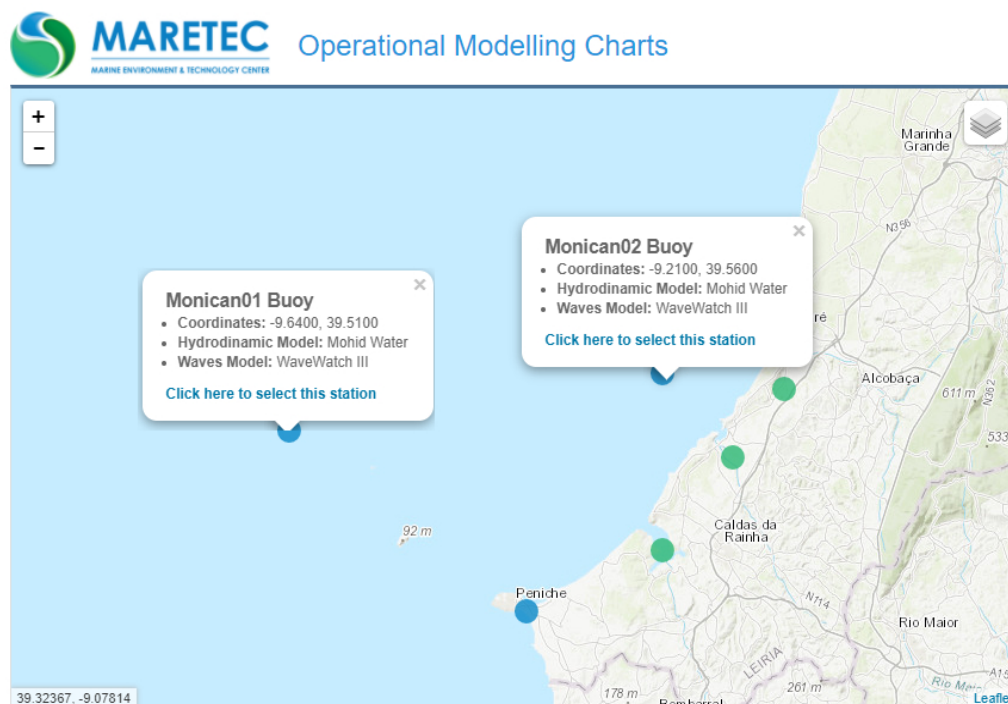


Figura 3.3: Plataforma *online* do MARETEC. [29]

## 3.2 Levantamento dos Dados de Interesse

### 3.2.1 Tipo de Dados de Interesse

Para efeitos de implementação, o período temporal escolhido para servir de análise ao caso de estudo é referente aos anos de 2016 e 2017. Com base no comportamento das ondas do mar nas duas localizações especificadas, tem-se como objetivo fazer comparações anuais, sazonais e espaciais da energia disponível no recurso.

Formalmente um estado do mar corresponde a um par de características, sendo estas a altura significativa e o período médio. Uma vez que o objetivo é quantificar a potência por frente de onda de cada estado do mar verificado durante o período temporal escolhido, procede-se ao levantamento dos dados referentes a essas características.

Para além da altura significativa e do período médio, é necessário também verificar o comportamento sazonal e anual da direção das ondas para uma escolha apropriada de do tipo de conversores se assim o resultado do estudo o indicar. Desta forma procede-se também ao levantamento dos dados de direção média das ondas para os anos de 2016 e 2017. Esta característica é representada em graus, 0 a 360, sendo que 180 graus corresponde à direção sul e o sentido de rotação é o horário.

### 3.2.2 Organização dos Dados

A metodologia utilizada na organização e processamento de dados é feita com auxílio do pacote *pandas* do *Python*, especializado para a manipulação de *data frames*. As séries temporais disponibilizadas pelo MARETEC são dadas em ficheiros *.csv* (*comma separated values*), que depois de lidas são agrupadas em *data frames*, indexadas pela data e hora, desde o dia 1 de janeiro (01h00) de 2016 até ao dia 1 de janeiro de 2018 (00h00). A *data frame* resultante para cada boia consiste em 17498 linhas com 3 colunas de dados: altura significativa, período médio e direção média. Seriam de esperar 17544 valores, admitindo as 24 horas diárias de valores estimados e tendo em conta que 2016 é ano bissexto. No entanto, no ano de 2016 registaram-se falhas no modelo nos meses de setembro e novembro, tendo sido estimados um total de 8737 valores quando seriam esperados 8784. É de referir ainda que na tabela 3.3 os dados de direção média para a localização da boia Monican01 não estão disponíveis na plataforma do MARETEC para levantamento devido a problemas com os servidores.

Tabela 3.3: *Data frame* para a Monican01: primeiros cinco valores estimados.

Data/Hora	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$\theta_m$ (graus)
01-01-2016 01:00	4,78	10,96	-
01-01-2016 02:00	4,74	11,03	-
01-01-2016 03:00	4,72	11,11	-
01-01-2016 04:00	4,72	11,22	-
01-01-2016 05:00	4,74	11,34	-
...			

Tabela 3.4: *Data frame* para a Monican02: primeiros cinco valores estimados.

Data/Hora	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$\theta_m$ (graus)
01-01-2016 01:00	4,49	10,78	292
01-01-2016 02:00	4,44	10,84	292
01-01-2016 03:00	4,42	10,91	293
01-01-2016 04:00	4,41	11,01	293
01-01-2016 05:00	4,40	11,11	293
...			

Com a definição das *data frames* representadas nas tabelas 3.3 e 3.4 e sendo elas indexadas por data e hora, é possível fazer uma seleção de dados de acordo com aquilo que é pretendido extrair da informação total. Desta forma, a informação mensal, anual e espacial das variáveis existentes são analisadas com recurso a estas duas *data frames*.

### 3.3 Metodologia para Processamento de Dados

Com a organização das séries temporais em *data frames*, nesta secção são abordadas as metodologias utilizadas para extrair diferentes tipos de informação dos dados originais.

Numa ótica de extrair informação para comparação mensal, anual e espacial pretende-se obter:

- Percentagem de Ocorrências de cada estado do mar.
- Contribuição de energia de cada estado do mar.
- Gráficos de comparação energética mensal e anual.
- Gráficos de comparação energética espacial.
- Curvas de duração da disponibilidade energética do recurso.
- Gráficos de picos energéticos.
- "Rosa das ondas" com informação sazonal e espacial do espetro de direções.

#### 3.3.1 Percentagem de Ocorrências de cada Estado do Mar

Uma vez recolhidas as séries temporais com dados relativos a altura significativa e período médio das ondas para os anos de 2016 e 2017, foi agrupada numa matriz a informação em estado bruto.

Através do histograma a duas dimensões foi possível criar uma matriz que relaciona a altura e o período das ondas. O histograma guarda em cada célula da matriz o número de ocorrências que foram verificadas nas séries temporais das várias combinações das duas variáveis. Para o eixo horizontal, que representa o período, foram utilizados intervalos unitários de 1 a 16 segundos, enquanto que para o eixo vertical foram utilizados meio metro de intervalo entre cada célula, percorrendo um alcance de 9 metros (3.1 e 3.2). Tal como está representado na equação 3.3, o valor de cada célula contém o somatório das observações registadas de um estado do mar com período e altura das ondas com valor compreendido entre o valor do limite anterior e do limite seguinte de cada célula. *MOD* significa valor estimado pelo modelo de ondas. *Bin<sub>T</sub>* representa o limite horizontal de cada célula (em segundos) e *Bin<sub>H</sub>* representa o limite vertical de cada célula (em metros).

$$T_m(i) = [0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16] \quad (3.1)$$

$$H_s(j) = [0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8; 8,5; 9] \quad (3.2)$$

$$Val_{cel} = \sum [bin_T(i) \leq MOD < bin_T(i+1)] \& [bin_H(j) \leq MOD < bin_H(j+1)] \quad (3.3)$$

A informação aglomerada nesta representação é muito importante na medida em que resume o historial de dois anos no que diz respeito ao comportamento das ondas do mar neste período temporal. Sob outro ponto de vista, este tipo de matriz serve como base para a escolha do equipamento certo de conversão de energia. Existindo diversos tipos de WEC (*Wave Energy Converter*), eles diferem, entre outras características, no ponto de funcionamento ideal. Por outras palavras, existem dispositivos que funcionam melhor para determinados estados do mar. Por esta razão é comum neste tipo de casos de estudo analisar a frequência de acontecimentos de cada estado do mar no período de estudo.

### 3.3.2 Potência por Frente de Onda

Partindo das *data frames* originais foi possível corresponder a cada estimativa de altura significativa e período médio um valor de potência por frente de onda. Para tal aproximação foi utilizada a fórmula representada pela equação 3.4 [8] que é uma função das duas variáveis.

$$P_{wave} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_m \quad \left[ \frac{W}{m} \right] \quad (3.4)$$

Desta forma é adicionada mais uma coluna de dados às *data frames* iniciais que representa a potência por frente de onda de cada estado do mar, dada em kW/m. O mesmo procedimento é feito para cada série temporal (tabelas 3.5 e 3.6).

Tabela 3.5: *Data frame* para a Monican01: primeiros cinco valores estimados de potência por frente de onda.

Data/Hora	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$P_{wave}$ (kW/m)
01-01-2016 01:00	4,78	10,96	123,204
01-01-2016 02:00	4,74	11,03	121,924
01-01-2016 03:00	4,72	11,11	121,774
01-01-2016 04:00	4,72	11,22	122,980
01-01-2016 05:00	4,74	11,34	125,351
...			

Tabela 3.6: *Data frame* para a Monican02: primeiros cinco valores estimados de potência por frente de onda.

Data/Hora	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$P_{wave}$ (kW/m)
01-01-2016 01:00	4,49	10,78	106,922
01-01-2016 02:00	4,44	10,84	105,136
01-01-2016 03:00	4,42	10,91	104,864
01-01-2016 04:00	4,41	11,01	105,347
01-01-2016 05:00	4,40	11,11	105,822
...			

### 3.3.3 Contribuição de Energia de cada Estado do Mar

A partir dos dados instantâneos da potência por frente de onda é possível calcular a energia disponível, integrando a curva de potência entre um certo período temporal. Tal integração é feita segundo uma aproximação que depende do tempo de amostragem dos valores estimados (eq. 3.5).

$$E_{wave} = \int P_{wave}(t) dt = \sum_{n=1}^N P_{wave}(n) \times \delta t \quad (3.5)$$

A soma de potência de todos os valores dentro de um período temporal resulta na energia disponível nesse período pois,  $\delta t$  neste caso é 1 (hora), uma vez que representa o intervalo de tempo entre cada amostragem. A variável  $N$  corresponde ao número de horas sobre o qual se pretende determinar a energia.

Da mesma maneira que são construídas as matrizes com a percentagem de ocorrência de cada estado do mar, também são construídas matrizes com a percentagem de contribuição de energia de cada estado do mar para a energia anual. Somando todos os valores de potência por frente de onda relativas às amostras de 2016 e 2017 é possível estimar a energia total disponível em cada ano.

Uma vez que o histograma a duas dimensões só permite saber o número de horas que cada estado do mar se verificou no período temporal escolhido, é necessário estabelecer uma estimativa de quanto é a energia disponibilizada por cada estado do mar. Para isso, é calculado o ponto médio de cada célula da matriz, sendo utilizado o valor médio de altura significativa e período médio de cada célula, associando um erro na estimativa da energia.

$$E_{cel} = \frac{\rho g^2}{64\pi} \left[ \frac{H_s(i) + H_s(i+1)}{2} \right]^2 \left[ \frac{T_m(j) + T_m(j+1)}{2} \right] N_{cel} \quad \left[ \frac{Wh}{m} \right] \quad (3.6)$$

A energia que cada estado do mar contribui é representada pelo valor de cada célula da matriz. Em 3.6 é feita a estimativa de cada valor, onde os índices  $i$  e  $j$  representam as posições dos eixos sobre os quais são construídas as matrizes. Partindo da matriz contendo a percentagem de ocorrências, ao valor  $N_{cel}$  (número de horas que cada estado do mar ocorreu) presente em cada célula é aplicada a fórmula acima descrita. Assim, em cada célula da matriz é calculada a sua potência média por frente de onda e, multiplicando o número de horas que ocorreram estados do mar com essa potência média resulta a energia contribuída por esses estados do mar.

Desta forma, quatro matrizes são construídas para análise no próximo capítulo: para cada localização e para cada ano.

### 3.3.4 Variabilidade Energética

#### 3.3.4.1 Variabilidade Energética Mensal e Anual

Com recurso às bibliotecas de funções do *Python* foi possível agrupar os dados de energia mensal somando todas as potências calculadas reunindo-as por mês e por ano. Desta forma é possível construir novas *data frames* indexadas por mês com duas colunas de dados: uma para o valor energético do respetivo mês em 2016 e outra em 2017. Da mesma forma é procedido para as duas boias. Assim, na tabela 3.7 estão agrupadas as duas *data frames* resultantes para o estudo de cada localização (Monican01 e Monican02).

Tabela 3.7: *Data frames* para a Monican02 e Monican01: variabilidade energética anual.

	Monican02	Monican02	Monican01	Monican01
Mês	$E_{2016}$ (kWh/m)	$E_{2017}$ (kWh/m)	$E_{2016}$ (kWh/m)	$E_{2017}$ (kWh/m)
Janeiro	47291,9	20356,1	55045,2	25006,6
Fevereiro	56889,3	41378,4	65151,4	49017,7
Março	29856,6	35504,4	34506,9	41241
Abril	23072,4	9247,6	27661,8	11108,1
Maio	5263,76	10185,4	6745,8	11373,8
Junho	3090,93	10793,7	3274,58	11783,2
Julho	4695,08	6921,3	5469,81	7833,44
Agosto	6470,89	5781,7	7469,82	6544,04
Setembro	11047,3	8124,49	11890,3	8774,4
Outubro	15330,3	15770,1	17637,7	17457,4
Novembro	16634,7	14299,6	19425,5	17187,8
Dezembro	29366,7	26241	34924,5	30703,5

O resultado desta aplicação permite comparar o comportamento energético dos mesmos meses entre cada ano. Para isso, a visualização desta informação num gráfico de barras é uma opção válida para análise.

#### 3.3.4.2 Variabilidade Energética Espacial

Da mesma forma que a informação energética pode ser agrupada por ano, pode também ser agrupada por localização. Esta metodologia aplica-se a fim de se verificar as diferenças energéticas simultâneas entre cada localização. Na tabela 3.8 estão agrupadas as *data frames* indexadas por mês, com duas colunas de dados, cada uma referente ao comportamento energético de uma localização. Esta metodologia permite verificar por mês as diferenças no comportamento energético entre cada localização simultaneamente (no mesmo ano).

Tabela 3.8: *Data frames* para 2016 e 2017: variabilidade energética espacial.

	2016	2016	2017	2017
Mês	$E_{mon02}$ (kWh/m)	$E_{mon01}$ (kWh/m)	$E_{mon02}$ (kWh/m)	$E_{mon01}$ (kWh/m)
Janeiro	47291,9	55045,2	20356,1	25006,6
Fevereiro	56889,3	65151,4	41378,4	49017,7
Março	29856,6	34506,9	35504,4	41241
Abril	23072,4	27661,8	9247,6	11108,1
Maio	5263,76	6745,8	10185,4	11373,8
Junho	3090,93	3274,58	10793,7	11783,2
Julho	4695,08	5469,81	6921,3	7833,44
Agosto	6470,89	7496,82	5781,7	6544,04
Setembro	11047,3	11890,3	8124,49	8774,4
Outubro	15330,3	17637,7	15770,1	17457,4
Novembro	16634,7	19425,5	14299,6	17187,8
Dezembro	29366,7	34924,5	26241	30703,5

### 3.3.5 Picos Energéticos

A análise da percentagem de picos energéticos que se verificam ao longo dos dois anos nas duas localizações de estudo são de grande importância. Este tipo de resultados permite saber quantas vezes ao longo do ano se verificam estados do mar com características extremas. O acontecimento de estados do mar extremamente energéticos é um indicador de tempestades ou outros fenómenos naturais. Estes fenómenos podem ser prejudiciais para a sobrevivência dos dispositivos de conversão.

Para quantificar o número de horas que ocorreu um determinado estado do mar com uma certa potência constrói-se uma curva de duas variáveis (para cada ano). Esta curva relaciona quantas horas um estado do mar esteve acima de uma certa potência instantânea.

Complementando a informação dada pelas curvas mencionadas, é possível verificar no andamento da potência ao longo dos anos os picos existentes. Assim, é possível quantificar a percentagem de tempo em que ocorreram picos, bem como verificar em que altura do ano ocorreram.





## ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo é feita a análise de todos os resultados obtidos por via das metodologias descritas no Capítulo 3.

De modo a poder retirar o máximo de conclusões significativas, procede-se à comparação dos resultados obtidos por ano e por localização. Ao comparar anualmente a informação extraída é possível verificar as diferenças do potencial energético ao longo do tempo. Ainda que dois anos não seja um período temporal representativo das mudanças interanuais que se verificam no local de estudo, permite representar o recente comportamento dos estados do mar. Ao comparar a informação extraída por localização é possível verificar as diferenças do comportamento das ondas à medida que aumenta a distância à costa.

Para haver simplicidade na descrição e análise dos resultados, ao referir a Monican01 e a Monican02, considera-se que estas representam as localizações das boias que por sua vez representam as localizações de estudo nesta dissertação.

Para a visualização dos dados extraídos é utilizada a biblioteca *Matplotlib*<sup>4</sup> do *Python* que possibilita representar a informação organizada por *data frames*, com recurso às que foram representadas no capítulo 3. Esta biblioteca de funções permite fazer representações de dados em gráficos temporais, histogramas a duas dimensões, gráficos de barras, "rosa das ondas", *box plots*, entre outras.

No final deste capítulo poder-se-á tirar conclusões sobre o potencial energético disponível neste local de estudo. Com base em todos os resultados obtidos e a sua respetiva análise é possível avaliar a possibilidade de produção de energia elétrica a partir do recurso disponível.

---

<sup>4</sup>*Matplotlib*: <https://pypi.org/project/matplotlib/>

## 4.1 Percentagem de Ocorrências de Cada Estado do Mar

### 4.1.1 Interpretação dos Resultados

Os resultados obtidos por aplicação da metodologia descrita na secção 3.3.1 são apresentados nas figuras 4.1 e 4.2. Através das matrizes são identificados os estados do mar que mais vezes ocorreram e a sua percentagem de ocorrência.

Apesar da larga extensão das matrizes em termos de altura significativa e período médio, é possível seccionar as matrizes para a zona onde há maior percentagem de ocorrências. Deste modo a comparação espacial e interanual é mais representativa.

Na figura 4.1 verifica-se que na localização representada pela boia Monican01, existem alterações na percentagem de ocorrências de cada estado do mar de um ano para o outro. Em 2016, os estados do mar que mais vezes se verificaram tiveram  $1,5 \text{ m} \leq H_s < 2 \text{ m}$  e  $5 \text{ s} \leq T_m < 6 \text{ s}$ , o que representa 4,43% de tempo. Em 2017, para a mesma localização verifica-se que os estados do mar que ocorreram com maior frequência tiveram exatamente as mesmas características que em 2016 mas com uma percentagem de ocorrência de 5,09%.

Seccionando as matrizes, verifica-se que a zona com maior percentagem de ocorrência nos dois anos tem características de  $1 \text{ m} \leq H_s < 3 \text{ m}$  e  $5 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$ . Deste modo, pode-se concluir que em 2016 cerca de 49% do tempo se verificou o mar com estas características enquanto que em 2017 se verificou cerca de 62% do tempo.

A figura 4.2 permite analisar a localização representada pela boia Monican02. Em ambos os anos, os estados do mar que mais vezes ocorreram tiveram  $1,5 \text{ m} \leq H_s < 2 \text{ m}$  e  $5 \text{ s} \leq T_m < 6 \text{ s}$ , tal como na localização anterior. Em 2016 estes estados do mar ocorreram em 4,82% do tempo enquanto em 2017 ocorreram em 4,65% do tempo.

Novamente, seccionando as matrizes para a zona onde há maior percentagem de ocorrências, verifica-se que em 2016 essa zona representa cerca de 48% do tempo enquanto que em 2017 representa pouco mais de 60% do tempo.

#### 4.1. PERCENTAGEM DE OCORRÊNCIAS DE CADA ESTADO DO MAR

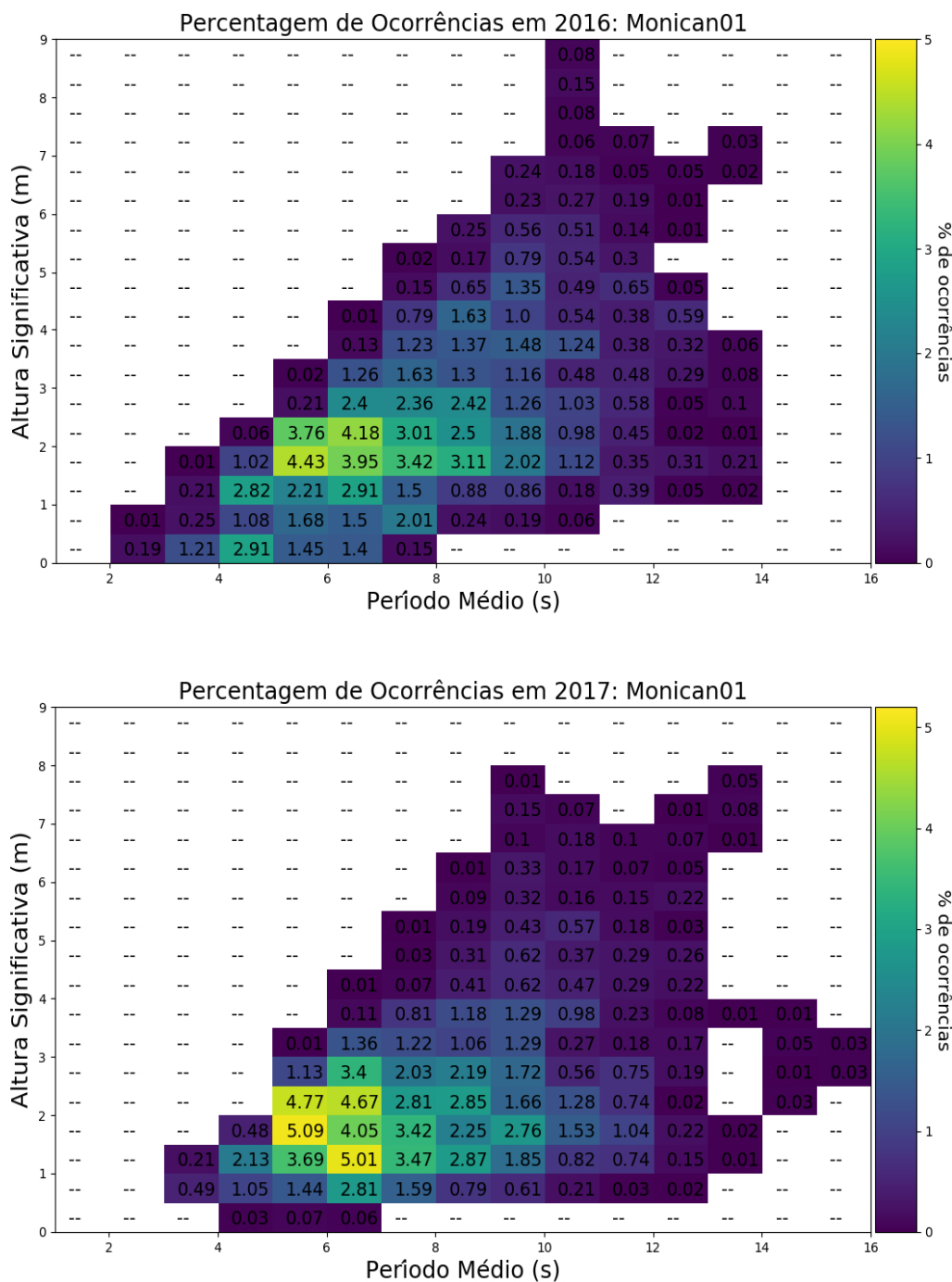


Figura 4.1: Percentagem de Ocorrências na Monican01 em 2016 e 2017.

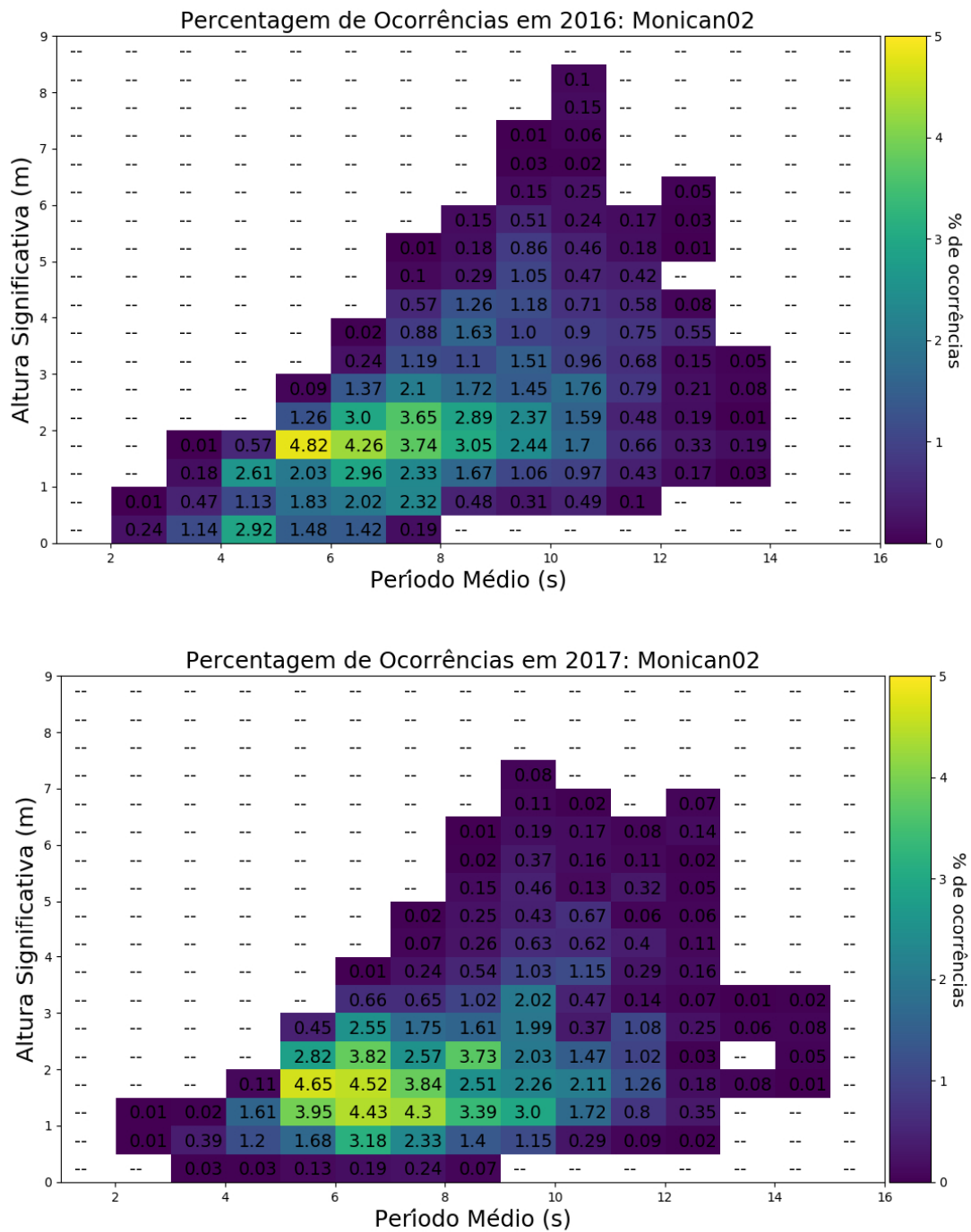


Figura 4.2: Percentagem de Ocorrências na Monican02 em 2016 e 2017.

### 4.1.2 Análise Interanual

Agregando a informação extraída das matrizes nas tabelas 4.1 e 4.2 facilmente se analisa o comportamento interanual para cada localização. Em cada tabela estão representados os intervalos de valores de altura significativa e período médio das ondas em que mais vezes os estados do mar ocorreram, a percentagem de acontecimentos com características das ondas dentro desses valores ( $\%_{cel}$ ) e a percentagem de acontecimentos de estados do mar com  $1\text{ m} \leq H_s < 3\text{ m}$  e  $5\text{ s} \leq T_m < 10\text{ s}$  ( $\%_{sec}$ ). O último valor representa uma secção da matriz que em todos os casos corresponde à zona com as características mais frequentes das ondas.

No período temporal em que incide este estudo constata-se que os estados do mar que ocorrem com maior frequência possuem ondas com altura significativa compreendida entre 1,5 e 2 metros e período médio compreendido entre 5 e 6 segundos. Com base nestes resultados não se verifica nenhuma variação desta característica de um ano para o outro. Por esta razão existe a necessidade de averiguar variações do comportamento das ondas através de uma abordagem diferente.

Com base na secção das matrizes onde existe um maior número de percentagem de ocorrências, pode-se concluir que existe um aumento de 12% a 13% de 2016 para 2017 no que diz respeito a acontecimentos de estados do mar com características dentro dos valores da matriz seccionada.

Tabela 4.1: Análise interanual para a Monican01.

Ano	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$\%_{cel}$	$\%_{sec}$
2016	1,5 - 2	5 - 6	4,43	49
2017	1,5 - 2	5 - 6	5,09	62

Tabela 4.2: Análise interanual para a Monican02.

Ano	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$\%_{cel}$	$\%_{sec}$
2016	1,5 - 2	5 - 6	4,82	48
2017	1,5 - 2	5 - 6	4,65	60

### 4.1.3 Análise Espacial

Reagrupando os resultados apresentados nas tabelas anteriores nas tabelas 4.3 e 3.4 pode-se concluir que os estados do mar que se verificam com maior frequência na localização representada pela Monican01 também são os que se verificam com maior frequência na Monican02 em ambos os anos, com percentagens de ocorrência a rondar os 5%. De forma a poder diferenciar qual a variabilidade de estados do mar consoante a distância à costa recorre-se a uma análise mais detalhada da matriz.

Em 2016 verificou-se que, para a localização da Monican01, 49% do tempo as ondas tinham características dentro dos limites da matriz seccionada, enquanto que para a localização da Monican02, 48%. Desta forma conclui-se que houve um aumento de acontecimentos de ondas com estas características à medida que se afasta da zona costeira.

Em 2017 verificou-se, que para a localização da Monican01, 62% do tempo as ondas tinham características dentro dos limites da matriz seccionada, enquanto que na localização da Monican02 apenas 60%. Tendo em conta o aumento de 1 a 2% de uma localização para a outra em ambos os anos, poderá constatar-se que em alto mar existe uma maior percentagem de acontecimentos de estados do mar com características de  $1 \text{ m} \leq H_s < 3 \text{ m}$  e  $5 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$ . Contudo, seria necessário realizar o mesmo estudo para anos anteriores de forma a poder comprovar esta afirmação.

Tabela 4.3: Análise espacial em 2016.

Localização	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	% <sub>cel</sub>	% <sub>sec</sub>
Monican01	1,5 - 2	5 - 6	4,43	49
Monican02	1,5 - 2	5 - 6	4,82	48

Tabela 4.4: Análise espacial em 2017.

Localização	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	% <sub>cel</sub>	% <sub>sec</sub>
Monican01	1,5 - 2	5 - 6	5,09	62
Monican02	1,5 - 2	5 - 6	4,65	60

## 4.2 Matrizes de Energia

As matrizes de energia, tal como as matrizes que apresentam a percentagem de ocorrências de cada estado do mar, apresentam a percentagem de energia que cada estado do mar contribui para a energia anual. Estas matrizes relacionam a potência média por frente de onda de determinados estados do mar com a quantidade de tempo que efetivamente estes ocorreram. Deste modo, com base na metodologia apresentada na secção 3.3.3, resultam quatro matrizes, para cada ano e para cada localização.

Este tipo de informação aglomerada em matrizes é especialmente importante tendo em conta o dispositivo WEC (*Wave Energy Converter*) a ser utilizado na conversão de energia. As matrizes apresentadas nas figuras 4.3 e 4.4 representam a energia disponível nas ondas no local de estudo. Em termos teóricos é possível determinar a produtividade de um certo dispositivo WEC. Para isso, multiplica-se a matriz de energia disponível pela matriz de desempenho do dispositivo. Desta forma, consegue-se ter uma aproximação de quanta energia é possível converter utilizando um determinado dispositivo durante um certo período temporal.

Ainda que as matrizes estejam representadas em percentagem de energia anual, também é possível fazer a mesma representação com os valores de energia absolutos de modo a calcular a energia anual (tabela 4.5).

Tabela 4.5: Energia anual em cada localização.

Localização	$E_{2016}$ (MWh/m)	$E_{2017}$ (MWh/m)
Monican01	289	238
Monican02	249	204

### 4.2.1 Interpretação dos Resultados

Para a localização da boia Monican01 (figura 4.3) verifica-se que em 2016 os estados do mar com maior contribuição energética tinham características de  $4,5 \text{ m} \leq H_s < 5 \text{ m}$  e  $9 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$ , contribuindo com 4,3% da energia anual estimada. Para a mesma localização, em 2017 verificaram-se maiores contribuições energéticas de estados do mar com características de altura das ondas mais baixas, sendo que estados do mar com  $3,5 \text{ m} \leq H_s < 4 \text{ m}$  e  $9 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$  contribuíram com 3,12% da energia anual estimada.

Para a localização da boia Monican02 (figura 4.4) verificou-se que em 2016 quase 3,9% da energia anual é proveniente de estados do mar com características de  $4,5 \text{ m} \leq H_s < 5 \text{ m}$  e  $9 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$ . Em 2017, 4,27% da energia anual advém de estados do mar com  $3 \text{ m} \leq H_s < 3,5 \text{ m}$  e  $9 \text{ s} \leq T_m < 10 \text{ s}$ .

Tendo em conta as matrizes com a percentagem de ocorrências, conclui-se que em nenhum caso, os estados do mar que ocorreram mais vezes são os que têm uma maior contribuição de energia. Isto deve-se ao facto de a potência por frente de onda aumentar com o quadrado de  $H_s$ . Assim, verifica-se que existe uma tendência natural para que sejam

os estados do mar com alturas significativas maiores a serem os que mais contribuem para a energia anual. Ainda assim, também se verificam alguns casos de valores extremos de altura significativa das ondas que não se refletem numa grande contribuição de energia pelo facto de apenas terem ocorrido durante um pequeno período temporal.

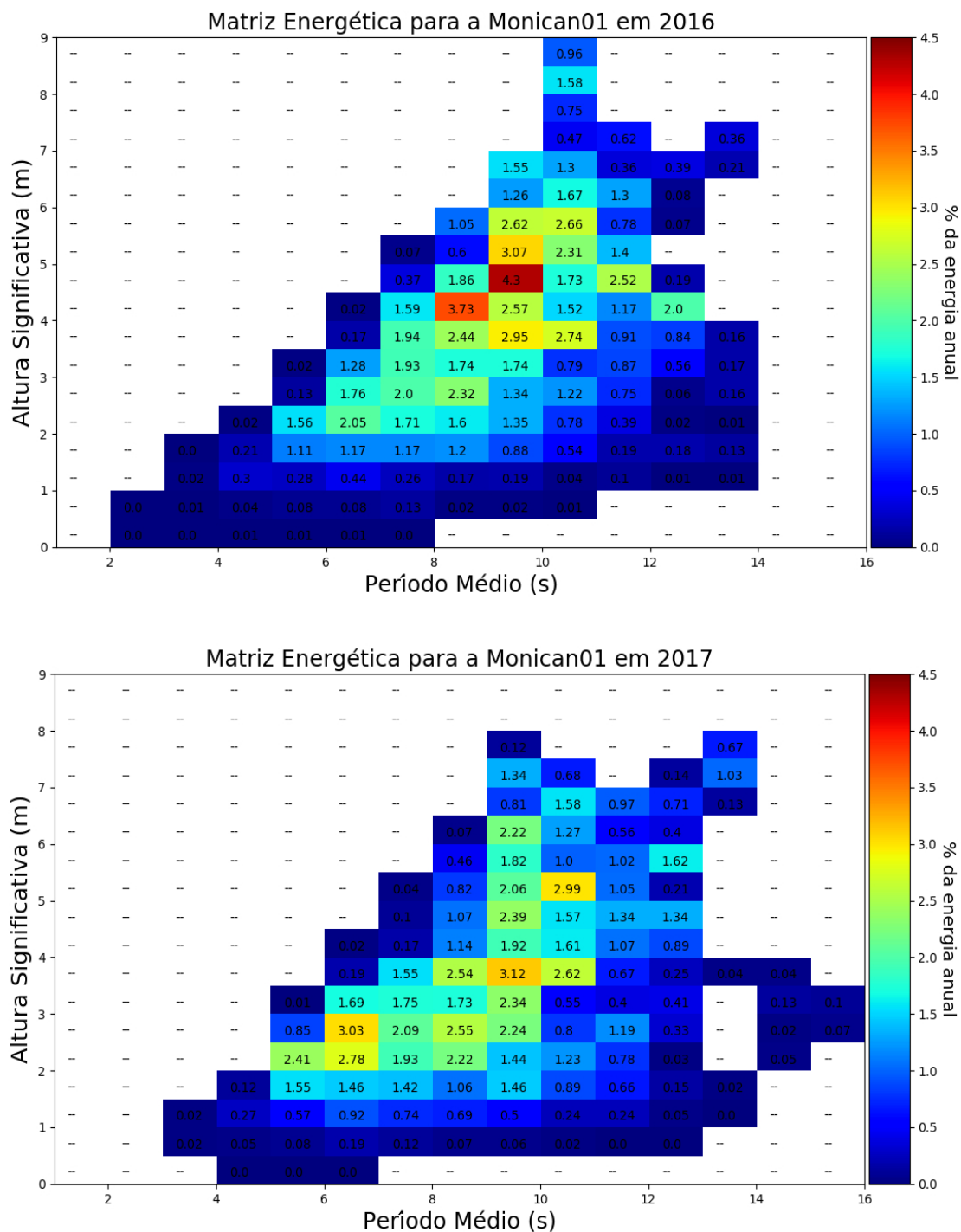


Figura 4.3: Matriz de Energia para a Monican01 em 2016 e 2017.



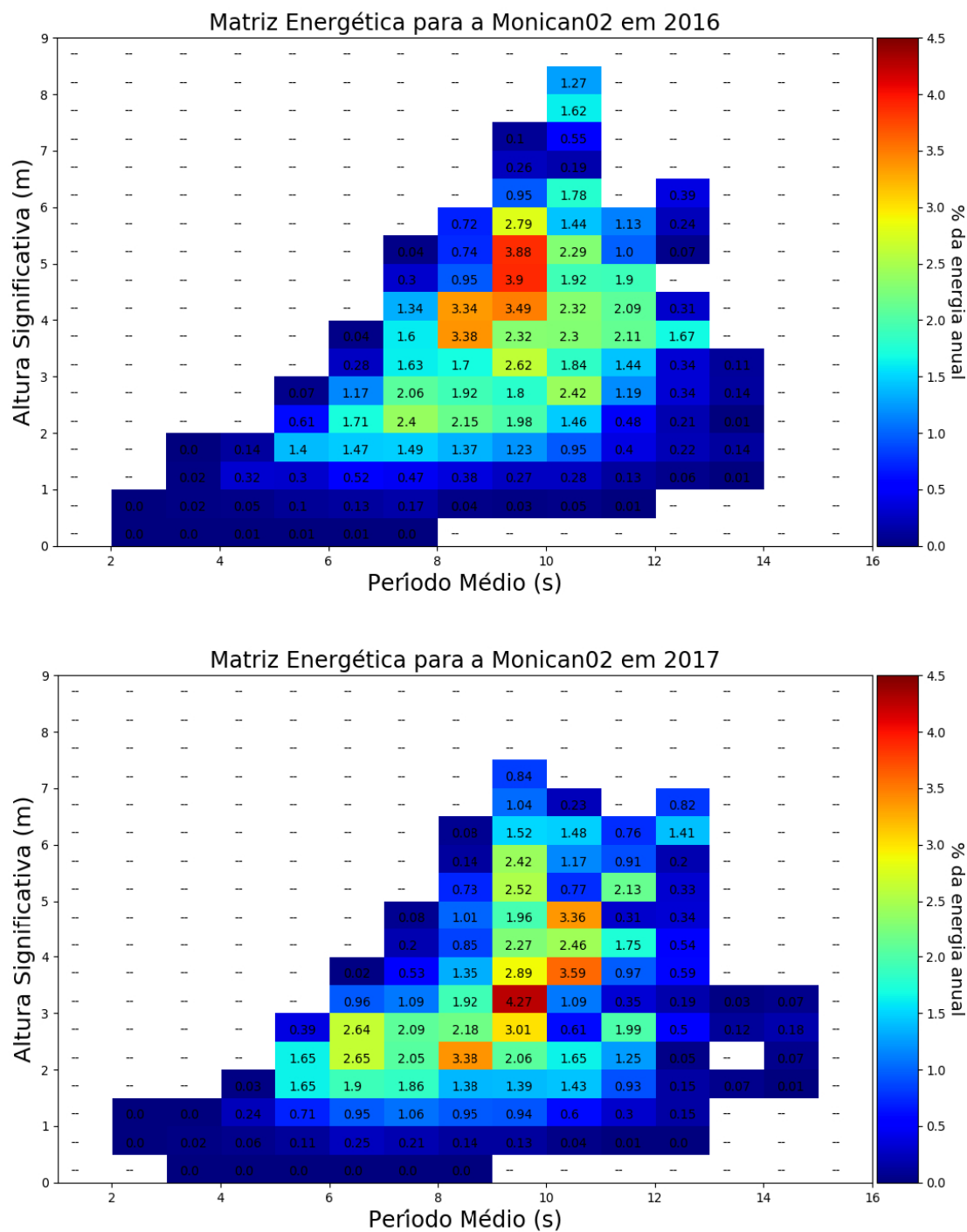


Figura 4.4: Matriz de Energia para a Monican02 em 2016 e 2017.

### 4.2.2 Análise Interanual e Espacial

Tal como está representado na tabela 4.6, é possível analisar as variações anuais e espaciais no que diz respeito às características dos estados do mar que mais contribuíram para a energia anual.

Na localização da boia Monican01, os estados do mar mais representativos na energia anual contribuíram cerca de 12 MWh/m dos 289 MWh/m totais estimados, enquanto que em 2017 cerca de 7 MWh/m do total de 238 MWh/m. Isto reflete-se numa diminuição percentual de 4,3% para 3,12% de 2016 para 2017. Na localização da boia Monican02, de 2016 para 2017 reflete-se um aumento de 3,9% para 4,27% de energia provenientes de estados do mar com características descritas na tabela 4.6.

Para analisar o comportamento espacial é necessário ter em conta que as variações descritas são feitas da localização da boia Monican02, onde a profundidade é menor, para a localização da Monican01, onde a profundidade é maior. Assim, analisando os resultados obtidos, conclui-se que em 2016, de perto da costa para alto mar houve um aumento de 3,9% para 4,3% de energia contribuída por estados do mar com exatamente as mesmas características. Em 2017 verificou-se o contrário, sendo que houve uma diminuição de 4,27% para 3,12% de energia proveniente de estados do mar com a maior contribuição.

Tabela 4.6: Variação anual da maior contribuição de energia.

Localização	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$E_{2016}$ (%)	$H_s$ (m)	$T_m$ (s)	$E_{2017}$ (%)
Monican01	4,5-5	9-10	4,3	3,5-4	9-10	3,12
Monican02	4,5-5	9-10	3,9	3-3,5	9-10	4,27

### 4.3 Variabilidade Energética

Nesta secção é analisado o comportamento energético do local através das variações mensais existentes ao longo dos dois anos de estudo e dos dois pontos de localização distintos. Esta análise é feita com base nos resultados obtidos por via da metodologia utilizada na secção 3.3.4.

#### 4.3.1 Variabilidade Mensal e Anual

Na figura 4.5 estão representados os valores de energia por frente de onda (MWh/m) mensais para cada ano de estudo na localização da boia Monican01.

A altura do ano mais energética é no inverno, com o mês de fevereiro a ser o mês mais energético em ambos os anos ( $>60$  MWh/m em 2016 e  $>40$  MWh/m em 2017). Este facto deve-se às condições meteorológicas mais adversas que usualmente se costumam verificar na estação de inverno, resultando em condições do mar mais extremas.

Analizando o gráfico de variação percentual (4.5) entre o mesmo mês de cada ano verifica-se uma diminuição significativa dos valores energéticos dos meses de inverno de 2016 para 2017 (janeiro, fevereiro e dezembro) e um aumento nos meses entre primavera e verão (maio, junho e julho). Nos meses de outono não se verificam grandes variações percentuais de 2016 para 2017, sendo que outubro é o mês em que a disponibilidade energética na localização da Monican01 se mantém mais constante de um ano para o outro. O mês em que se verifica uma maior discrepância é junho, onde em 2017 houve um aumento de mais de 250% em relação ao ano de 2016 ( $<4$  MWh/m em 2016 e  $>11$  MWh/m em 2017). Numa situação mais atípica, o mês de abril apresenta uma diminuição em 2017 de mais de 50% em relação a 2016, contrariando o comportamento nos outros meses de primavera. Também ao contrário do que aconteceu nos outros meses de verão, em agosto houve uma pequena diminuição energética de 2016 para 2017, embora este comportamento siga a tendência dos meses seguintes onde a variação percentual teve um baixo valor absoluto.

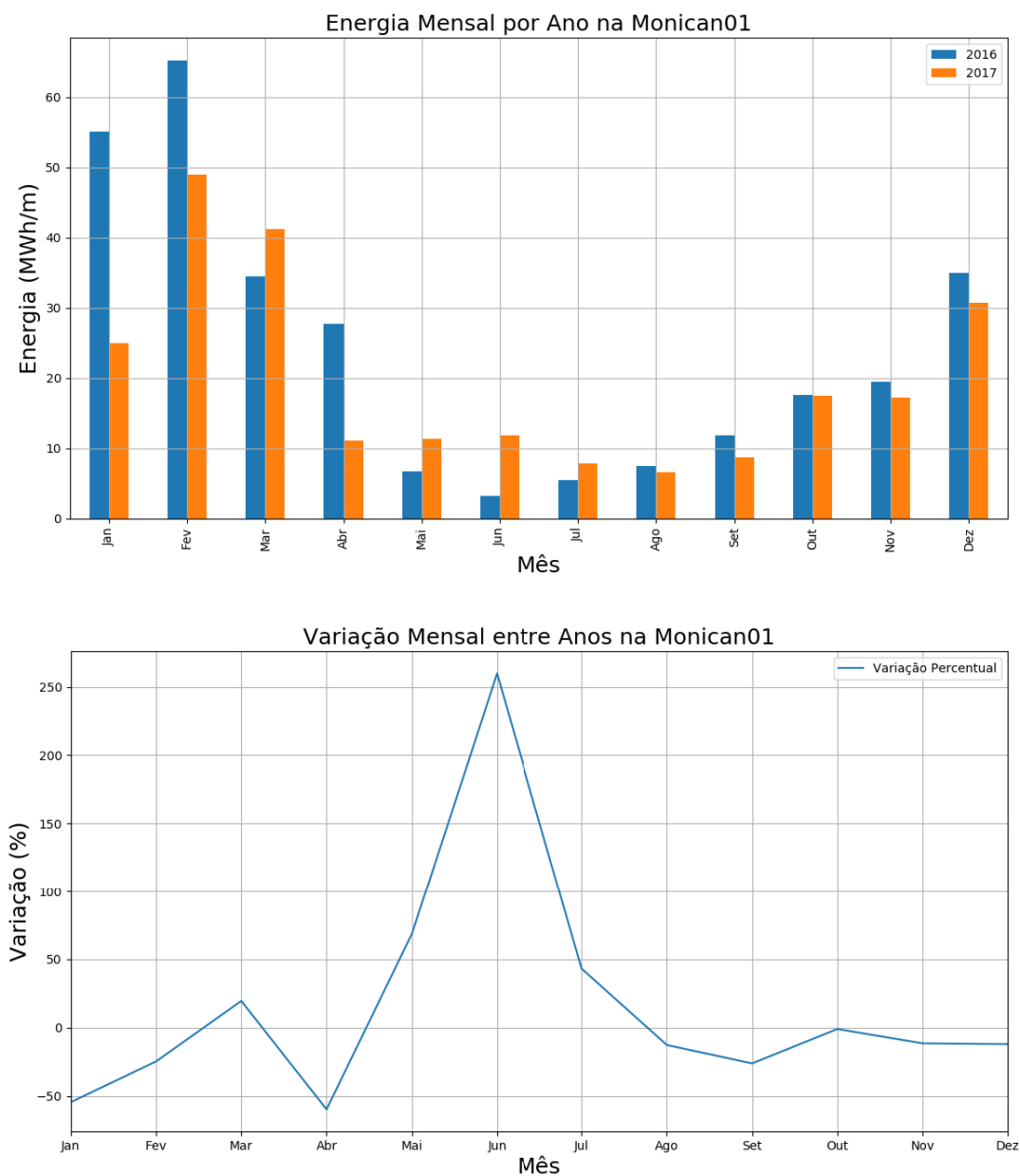


Figura 4.5: Comparação energética anual e mensal na Monican01.

A figura 4.6 apresenta os valores mensais de energia por frente de onda nos dois anos distintos na localização da Monican02. Nos gráficos visualiza-se um comportamento semelhante de variação percentual ao que foi verificado na localização da Monican01. Em março, maio, junho e julho houve um aumento energético entre os mesmos meses de 2016 para 2017 enquanto que em janeiro, fevereiro e dezembro verificou-se uma diminuição percentual de um ano para o outro.

Uma vez que estamos a analisar o comportamento das ondas ao longo do tempo, é normal que se registem as mesmas variações percentuais entre os mesmo meses de um ano para o outro nas duas localizações, uma vez que apesar de estarem separadas por cerca de 37 km representam a mesma área de estudo. Esta afirmação tem fundamento no facto de quando existe condições extremas do mar numa localização, simultaneamente se verificarão condições extremas na outra, o mesmo acontecendo para condições mais moderadas.

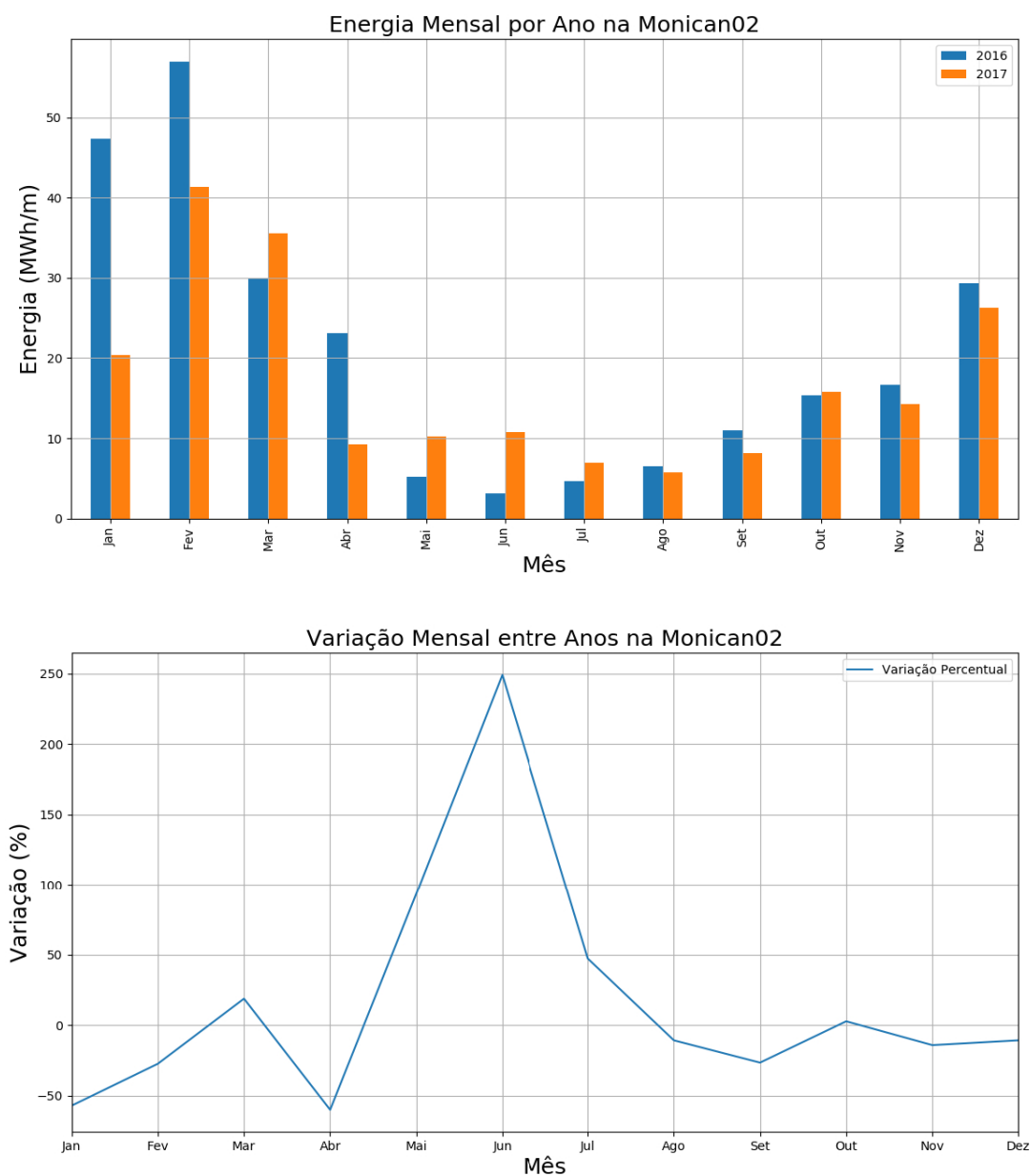


Figura 4.6: Comparação energética anual e mensal na Monican02.

### 4.3.2 Análise Espacial

Tendo em conta o que foi dito anteriormente, na análise feita em 4.3.1 o tempo é a variável que se altera, comparando as variações energéticas percentuais de um ano para o outro. Neste caso, um dos objetivos de estudo é comparar simultaneamente as variações percentuais de existentes de uma localização para a outra e assim verificar a influência que a profundidade ao fundo do mar tem nas condições marítimas. Desta forma, mantêm-se constante a variável tempo, alterando-se a variável localização. Nesta análise espacial tem-se em conta que as variações percentuais foram calculadas da localização Monican02 para a Monican01 (perto da costa para alto mar).

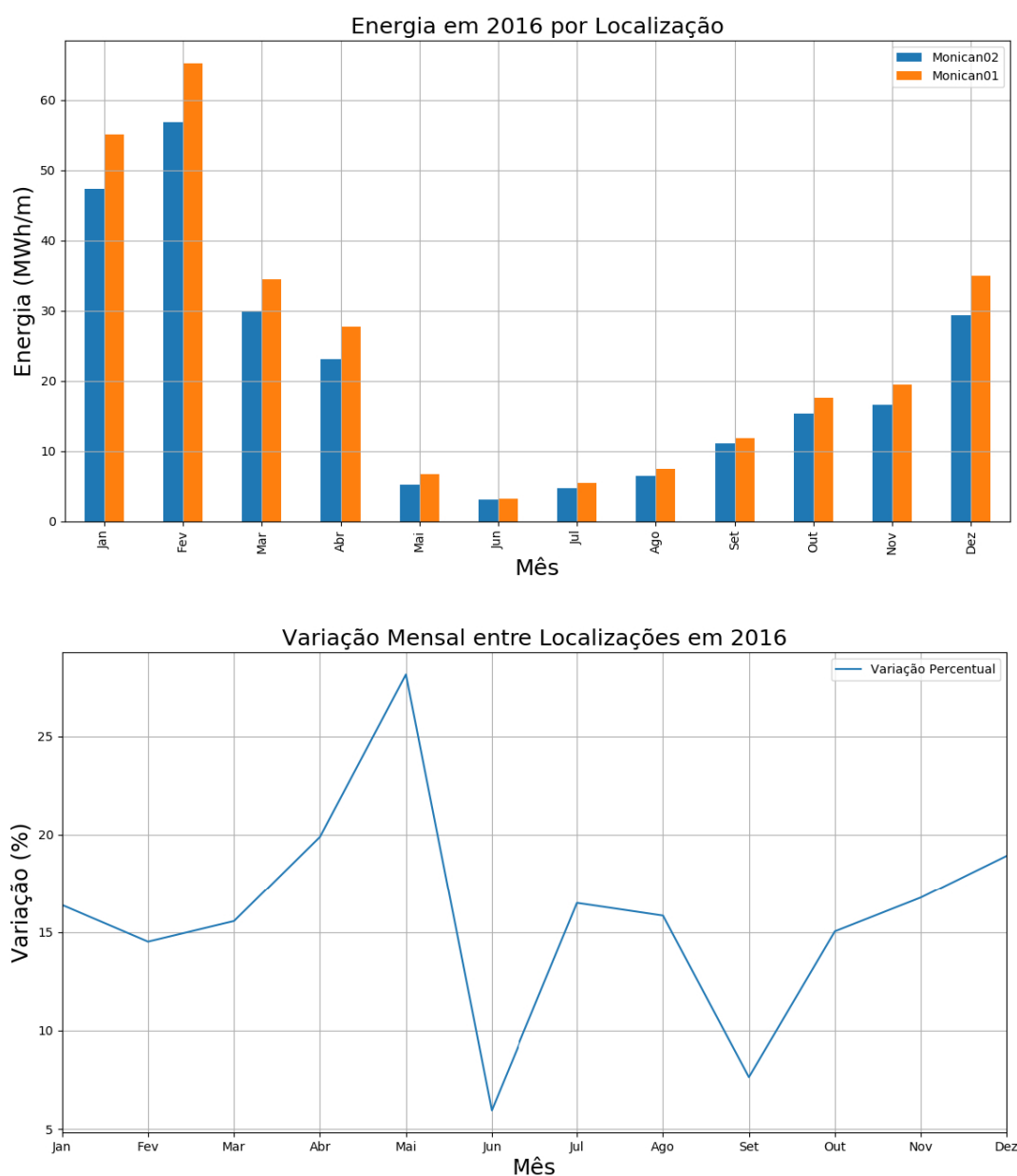


Figura 4.7: Comparação energética entre localizações em 2016.

Analisando a figura 4.7 verifica-se uma tendência que se caracteriza por um aumento energético da localização mais perto da costa para a localização mais longe da costa. No gráfico de variação percentual não se verificam valores negativos o que significa que em todos os meses de 2016 a energia disponível ao largo da costa foi sempre maior do que em perto da costa. Ainda assim, o mês em que se verificou uma maior discrepância a nível de variação percentual de energia foi em maio, onde na localização da Monican01 a energia disponível excedeu quase 30% em relação à energia disponível na localização da Monican02. O mês de junho de 2016 não só foi o mês em que se verificou a menor quantidade de energia disponível em ambas as localizações como foi o mês em que praticamente não se verificou diferenças na energia disponível de uma localização para a outra.

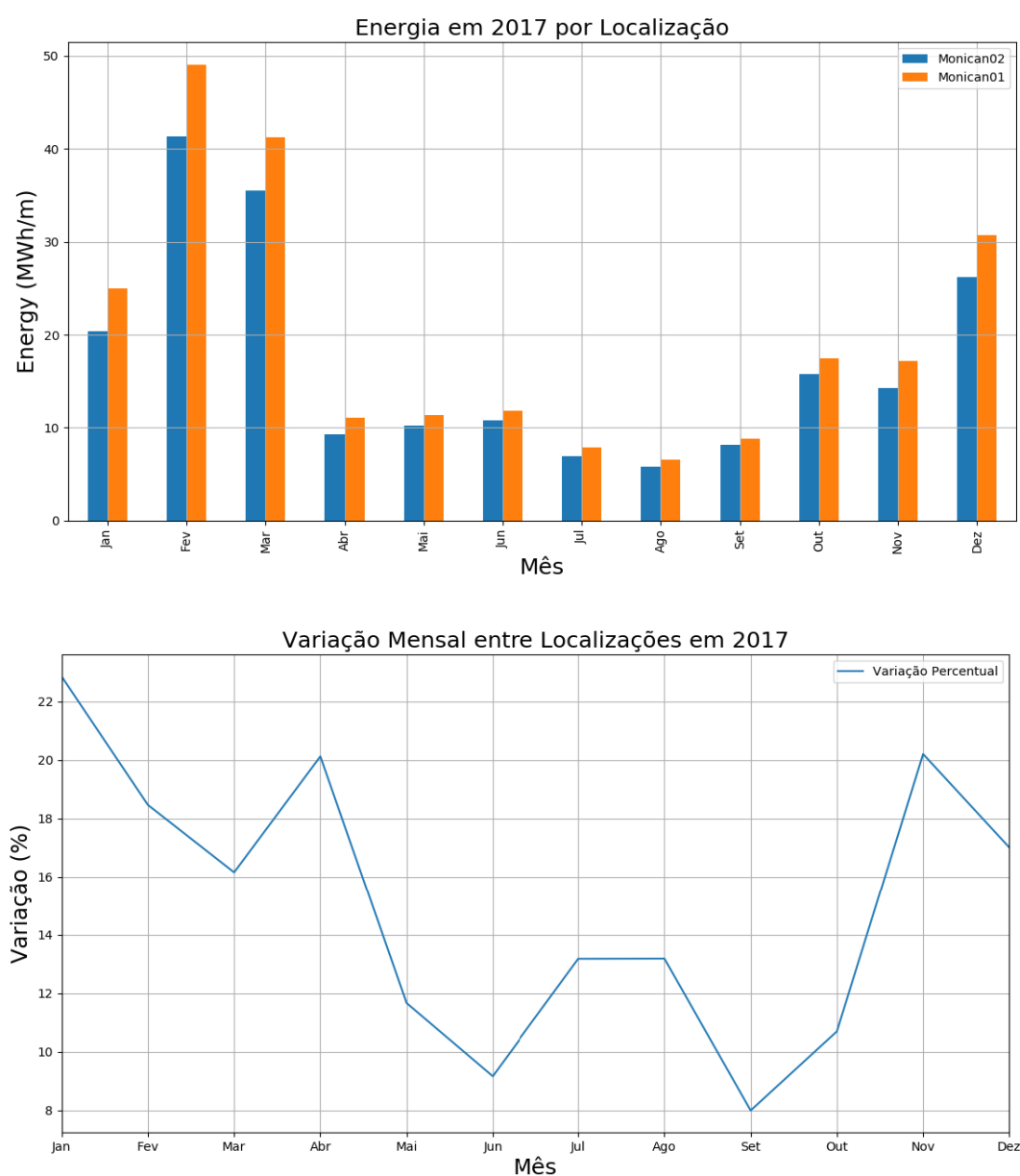


Figura 4.8: Comparação energética entre localizações em 2017.

Por análise da figura 4.8 constata-se que, também em 2017, a localização mais longe da costa disponibiliza mais energia do que a localização costeira em todos os meses do ano. Em 2017, a maior discrepância a nível de variação percentual de energia aconteceu no mês de janeiro com um aumento de mais de 20% da localização Monican02 para a Monican01. É de salientar ainda, que nos meses de julho e agosto houve praticamente a mesma variação percentual onde a Monican01 excedeu em cerca de 13% a energia disponível na Monican02.

### 4.4 Picos Energéticos

Na secção 3.3.5 é descrita a metodologia adotada para representar os picos energéticos existentes bem como a percentagem de tempo que eles ocorrem. Para efeitos de análise nesta dissertação, define-se como pico valores de potência por frente de onda superiores a 150 kW/m, na medida em que correspondem a ondas com cerca de 6 metros de altura, valor a partir do qual se consideram os estados do mar com condições de alguma severidade.

#### 4.4.1 Monican01

Na figura 4.9 estão representados os picos energéticos que ocorreram na localização da boia Monican01 nos anos de 2016 e 2017. Como seria de esperar, nos meses de verão as condições marítimas são moderadas, corroborando os resultados obtidos anteriormente, chegando a haver períodos com potência quase nula em 2016. Contabilizam-se cerca de 11 picos energéticos ( $>150$  kW/m) em ambos os anos, sendo que foi no mês de fevereiro que se verificou o valor mais alto de potência por frente de onda ( $>395$  kW/m em 2016 e  $>380$  kW/m em 2017).

Tendo em conta o gráfico da figura 4.10 é possível constatar que características do mar com uma potência por frente de onda superior a 150 kW/m apenas ocorrem em cerca de 3,1% do tempo em 2016 e 2,5% do tempo em 2017 na localização mais longe da costa. Os picos verificados no mês de fevereiro representam apenas cerca de 1% do tempo em cada ano.



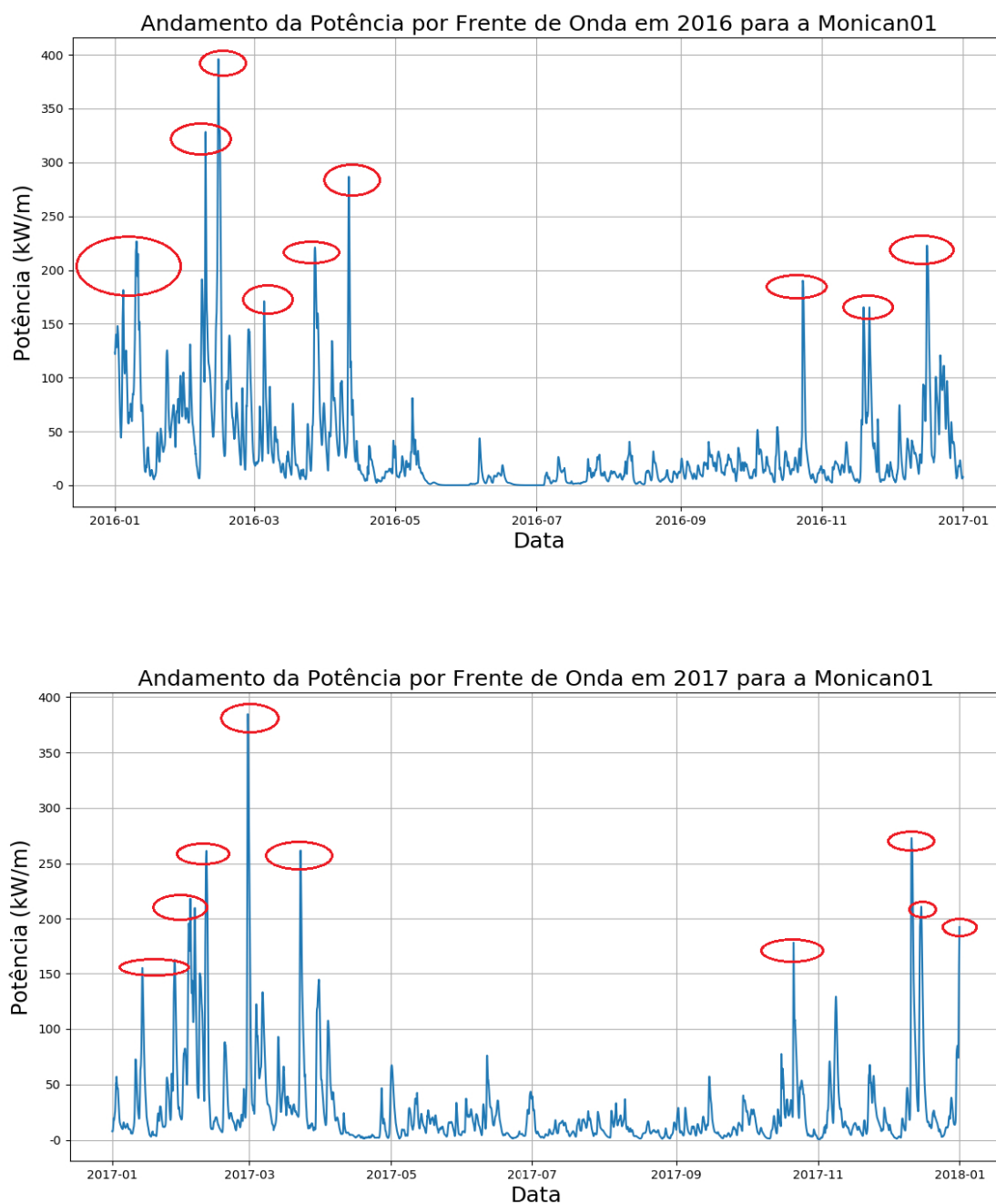


Figura 4.9: Picos energéticos em 2016 e 2017 na Monican01.

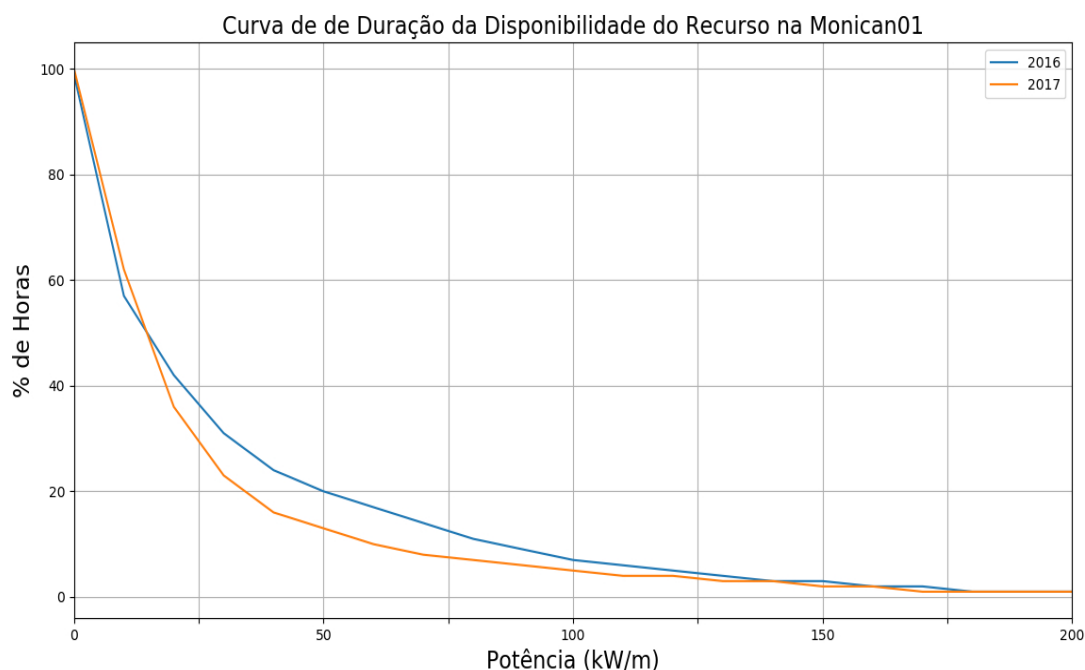


Figura 4.10: Curva de Duração da Disponibilidade do Recurso na Monican01.

#### 4.4.2 Monican02

Na figura 4.11 estão representados os picos energéticos que ocorreram nos anos de 2016 e 2017 na localização da boia Monican02. Aqui, tal como na localização mais longe da costa, os picos energéticos ocorreram sobretudo nos meses de inverno, enquanto que no verão os estados do mar raramente excederam os 50 kW/m de potência por frente de onda nos dois anos. O maior pico de 2016 ocorreu em fevereiro ( $>350\text{ kW/m}$ ). Também em 2017 o maior pico energético ocorreu no mês de fevereiro ( $>250\text{ kW/m}$ ), concluindo que esta localização apresentou valores mais baixos do que na localização ao largo da costa.

Relacionando com a percentagem de tempo em que ocorreram estes picos energéticos, em 4.12 verifica-se que os estados do mar que originam estes acontecimentos pontuais ( $>150\text{ kW/m}$ ) apenas ocorrem em cerca de 1,88% do tempo em 2016 e cerca de 1,71% em 2017. Os picos de valor energético mais elevado que aconteceram em fevereiro de 2016 e de 2017 representam menos de 1% do tempo em cada ano.

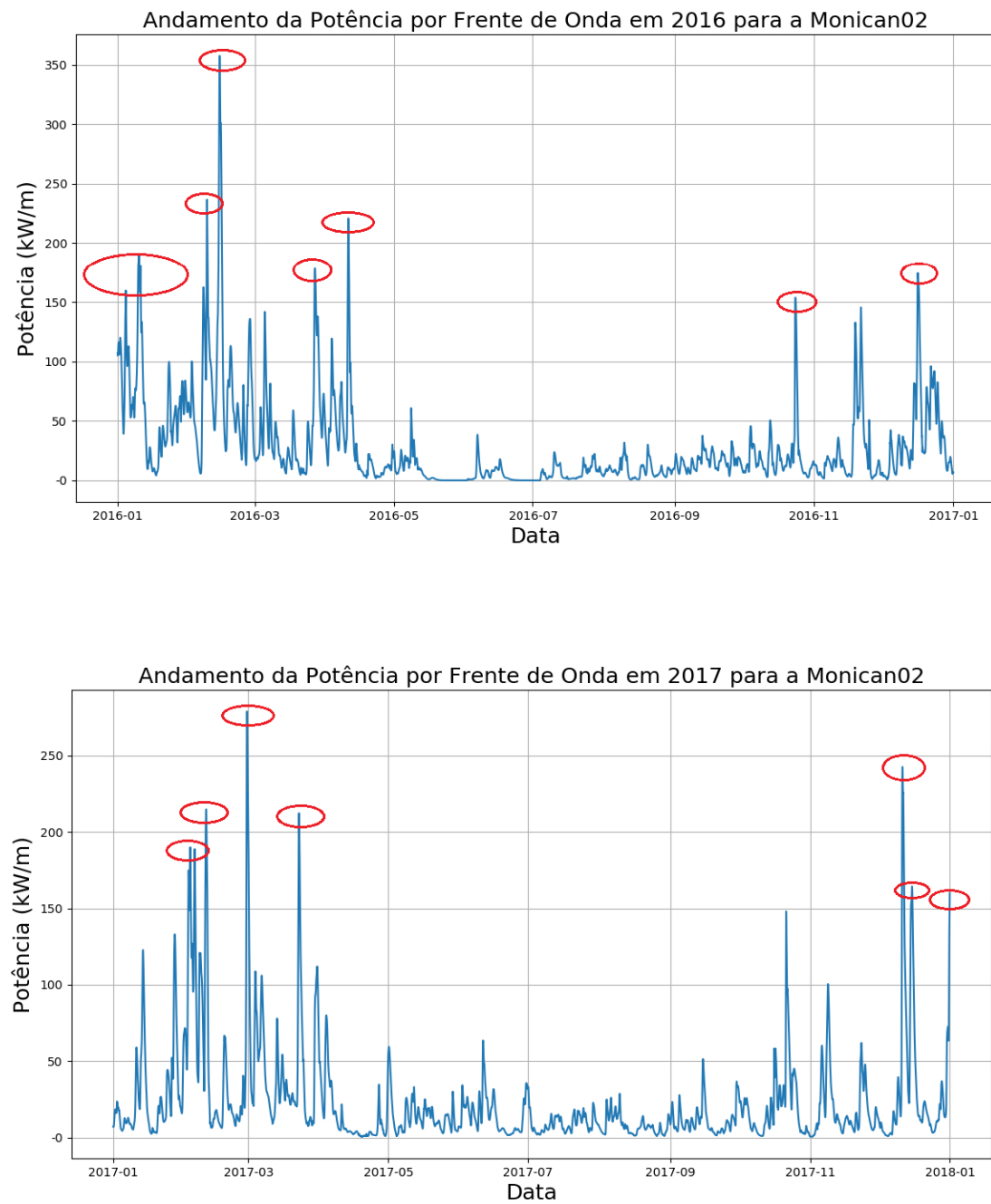


Figura 4.11: Picos energéticos em 2016 e 2017 na Monican02.

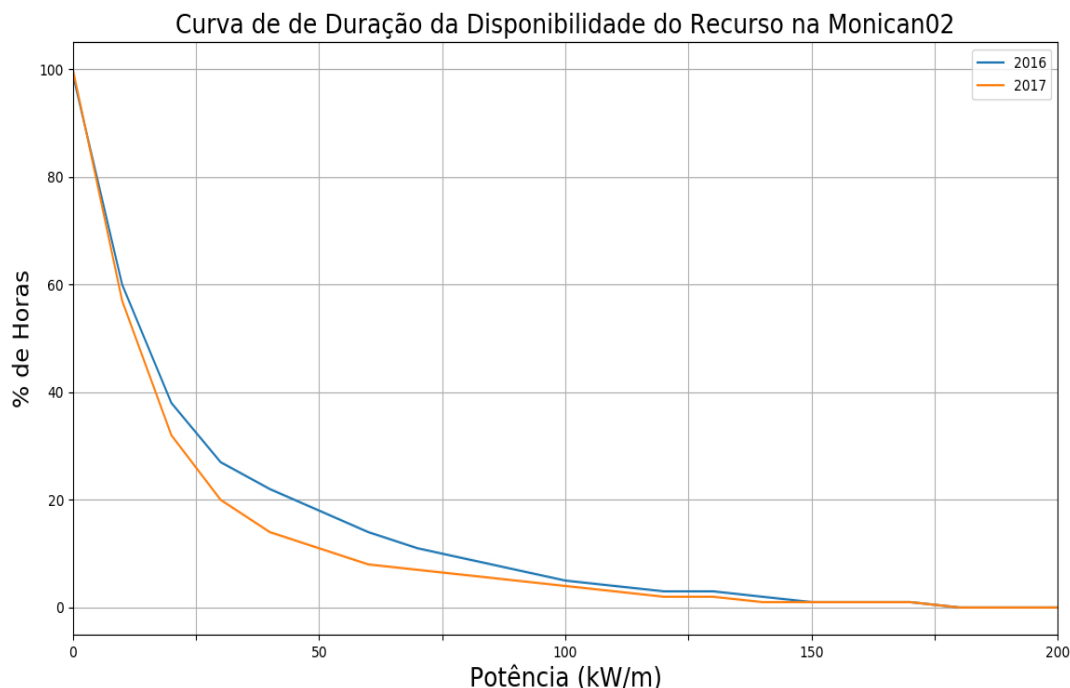


Figura 4.12: Curva de Duração da Disponibilidade do Recurso na Monican02.

Deste modo, conclui-se que é na localização mais longe da costa (Monican01) que existe maior percentagem de acontecimento de picos energéticos e estes possuem valores energéticos maiores do que na localização perto da costa. Por esta razão, a possibilidade de construção de uma central de conversão na localização Monican01 poderá trazer implicações (dependendo do WEC utilizado) relacionadas com a sobrevivência dos dispositivos devido a condições extremas um pouco mais frequentes.

## 4.5 Análise Direcional

Nesta secção são apresentadas as "rosas das ondas" contendo os histogramas com a frequência de ocorrência de ondas com determinada direção de deslocamento. Os dados disponibilizados pelo MARETEC dizem respeito à direção de onde as ondas vêm nos pontos de localização em estudo e não para onde se propagam a partir da localização de estudo. Para exemplificar o comportamento direcional das ondas na costa litoral portuguesa, a figura 4.13 representa não só esse mesmo comportamento como o da altura significativa das ondas no dia 30 de agosto de 2018, sendo esta informação retirada do site oficial do IPMA (*Instituto Português do Mar e da Atmosfera*). Analisando a figura, as ondas surgem de noroeste e propagam-se para sudoeste, junto à costa litoral. Na escala de cores, o azul mais escuro representa ondas com menos de 1 metro de altura significativa enquanto que o azul mais claro representa ondas até 3 metros. Na zona do Canhão da Nazaré, verificam-se ondas provenientes de direções do quadrante II da "rosa das ondas".

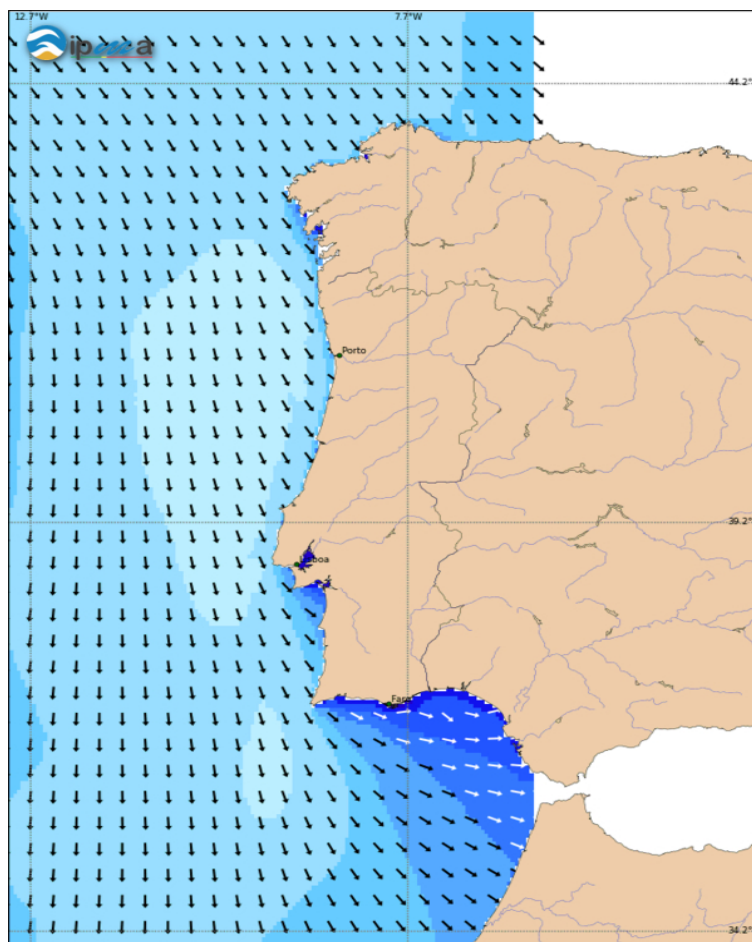


Figura 4.13: Comportamento direcional das ondas no dia 30 de agosto de 2018. [30]

Sendo estes dados de comportamento direcional apresentados em graus, é comum fazer a representação deste tipo de dados como se da análise direcional do vento se tratasse. Neste caso, a escala de cores das "rosas das ondas" diz respeito à potência por frente de onda em cada sentido direcional. Os valores apresentados de forma radial representam a percentagem de ocorrência de ondas com determinada origem direcional. Desta forma é possível verificar quais são as direções de propagação que conduzem as ondas mais energéticas. Todas as "rosas das ondas" foram construídas com auxílio da biblioteca *Openair*<sup>5</sup> e da linguagem de programação R, através da função *windrose*. Esta função faz o histograma da percentagem de ocorrências das ondas de acordo com a direção e da potência por frente de onda.

<sup>5</sup>*Openair*: <https://www.rdocumentation.org/packages/openair/versions/0.8-1>

### 4.5.1 Monican02

A figura 4.14 apresenta a informação sobre o comportamento direcional das ondas em 2016, dividindo a representação por estações do ano.

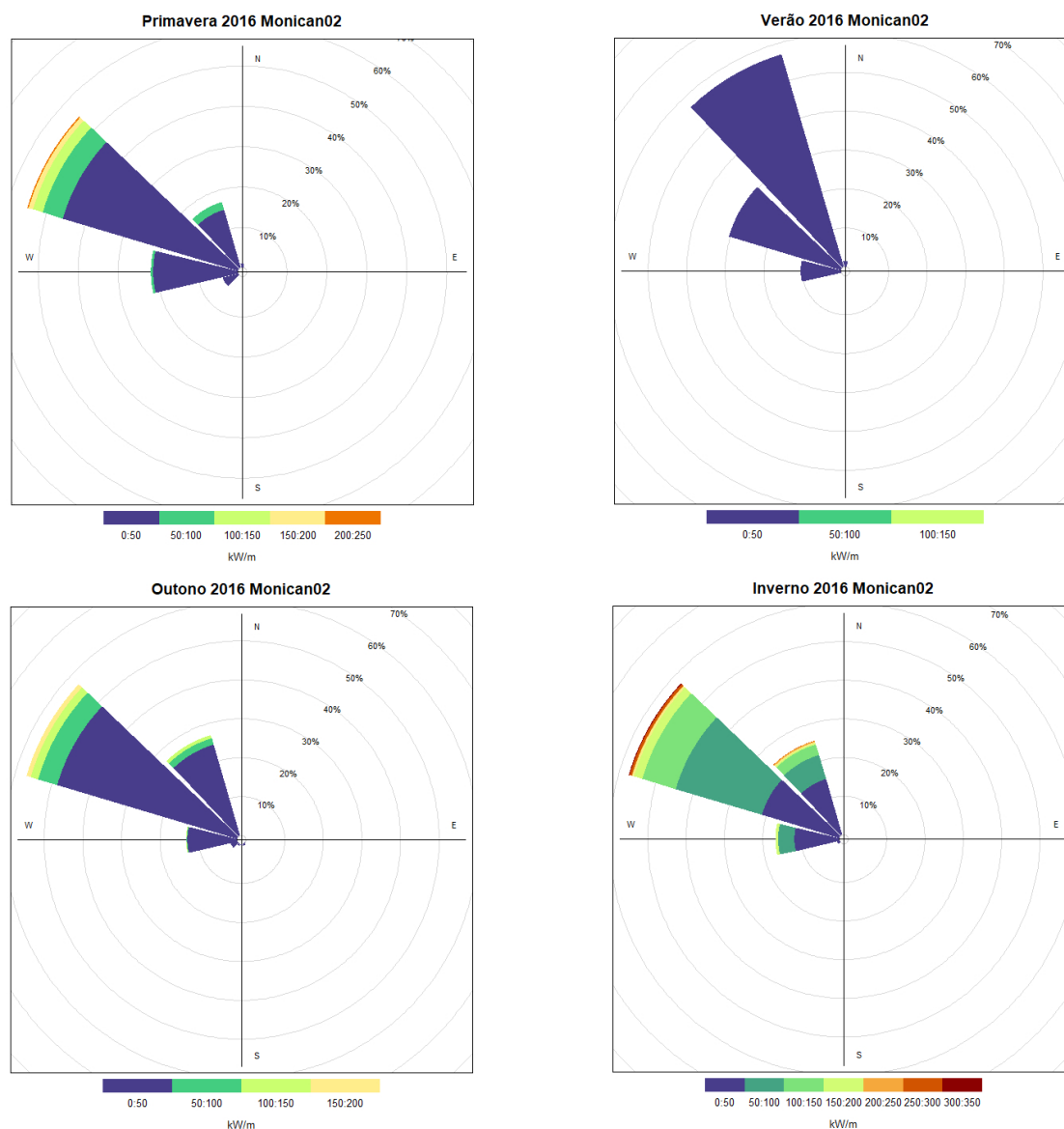


Figura 4.14: "Rosa das Ondas" sazonal em 2016 para a localização da boia Monican02.

Em todas as estações do ano, a direção predominante de onde as ondas surgem na localização Monican02 está situada no quadrante II da "rosa das ondas". Verifica-se ainda que entre 10% a 20% do tempo em cada estação, as ondas surgiram a oeste da localização, enquanto que na restante percentagem do tempo, as ondas surgiram de outras direções do quadrante II. Na primavera, outono e inverno registaram-se ainda curtos períodos temporais em que as ondas surgiram de sudoeste. De forma semelhante, na primavera e no verão registaram-se ondas provenientes de norte. Pelo facto de serem acontecimentos

com muito baixa percentagem de ocorrências, não são considerados significativos.

Relacionando a direção de propagação das ondas com a potência por frente de onda associada, no verão verificam-se condições energéticas mais baixas, nunca ultrapassando os 50 kW/m. No inverno, sendo noroeste a direção de proveniência das ondas a mais frequente, houve períodos de tempo em que os estados do mar com essa direção chegaram acima de 300 kW/m de potência por frente de onda.

Concluindo, em todas as estações do ano 2016, as ondas surgiram mais frequentemente da direção noroeste da localização da boia Monican02, sendo que existe um aumento significativo gradual de potência por frente de onda disponível desde o verão para o inverno.

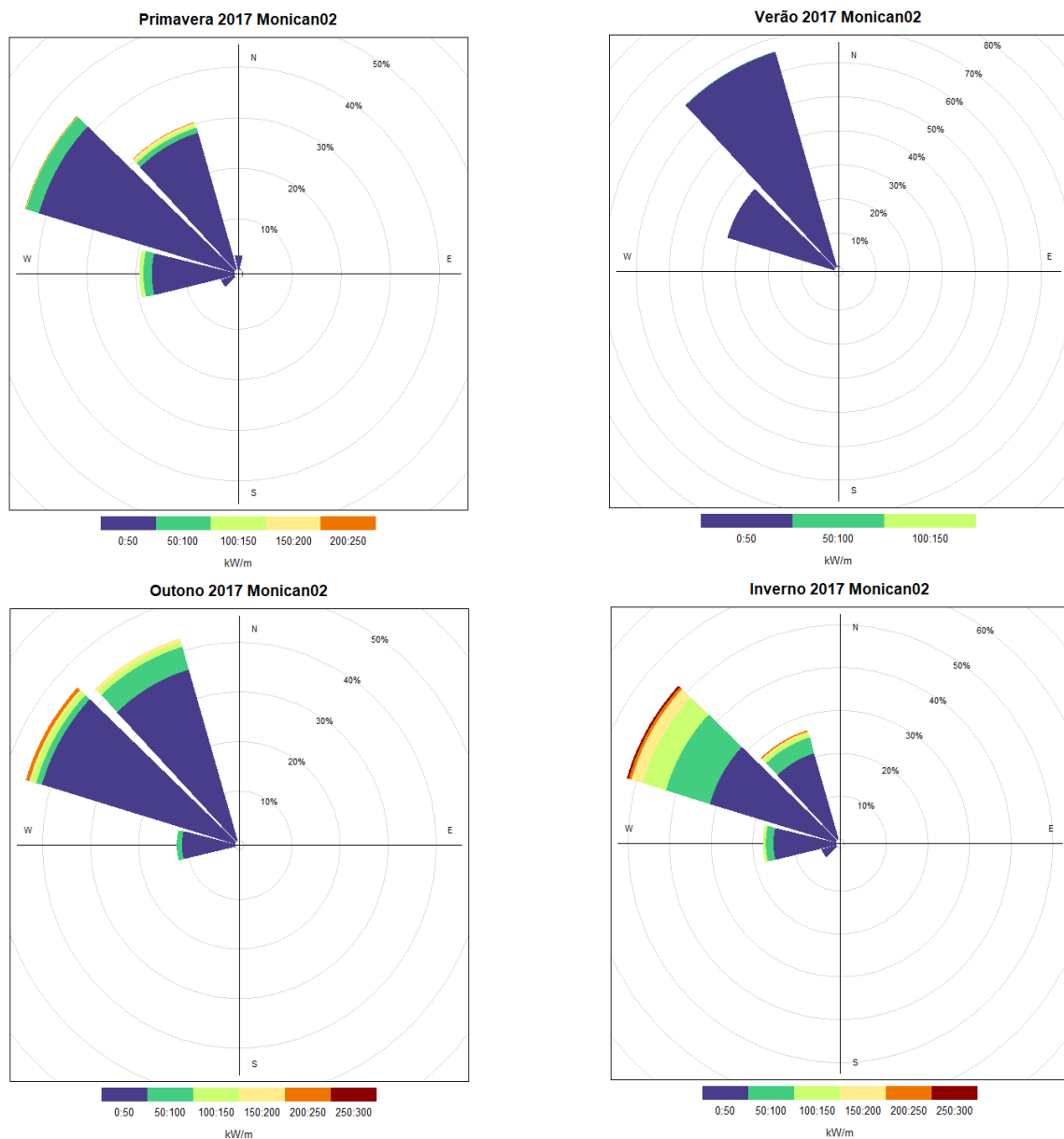


Figura 4.15: "Rosa das Ondas" sazonal em 2017 para a localização da boia Monican02.

Tal como aconteceu em 2016, também em 2017 (figura 4.15) a direção de onde as ondas surgiram com maior frequência foi a noroeste da localização e numa percentagem de tempo considerável, oeste. Embora o comportamento direcional tenha sido semelhante em ambos os anos, em 2017 verificaram-se condições menos energéticas no inverno e mais energéticas no outono, por comparação às estações do ano 2016. O verão continua a ser a estação do ano menos energética, com valores de potência por frente de onda inferiores a 50 kW/m.

A informação direcional das ondas é importante para, no futuro, se poder escolher e adaptar o dispositivo WEC no sentido de propagação das ondas. Existem dispositivos de conversão que, pela sua natureza geométrica, devem ser ajustados para que este não preste resistência contra a direção de propagação natural das ondas, aproveitando ao máximo o potencial energético. Na verdade, o objetivo do dispositivo WEC é absorver ao máximo a potência das ondas incidentes. Da mesma forma, pode-se ajustar o período natural de oscilação dos dispositivos WEC para o período mais provável que o estado do mar pode assumir no local de interesse [31]. Para isso é necessário ter em conta que para períodos das ondas mais elevados requer dispositivos com uma estrutura mais larga. Deste modo, conclui-se que o conhecimento da direção de propagação e o período natural das ondas no local pode contribuir para a escolha apropriada do dispositivo de conversão.

### 4.5.2 Monican01

Por motivos de indisponibilidade da plataforma *online* do MARETEC, não foi possível proceder ao levantamento dos dados direcionais para a localização desta boia. Ainda assim, uma vez que as duas localizações de estudo se encontram separadas por apenas 37 km, pode-se assumir que o comportamento direcional das ondas é semelhante.



## INTERPOLAÇÃO DE VALORES ENERGÉTICOS

No seguimento do estudo feito nos capítulos 3 e 4, existe a necessidade de validar os resultados energéticos já estimados. Uma vez que os dados que serviram de *input* para a estimativa já realizada foram levantados da plataforma *online* do MARETEC, neste capítulo são utilizados dados de um modelo numérico levantados da plataforma *online* do CMEMS (serviço de monitorização marinha do programa *Copernicus*, secção 2.3.4). Desta forma, o modelo numérico faz estimativas dos parâmetros das ondas em cada ponto espacial de uma grelha, ao contrário do modelo numérico do MARETEC que faz estimativas dos parâmetros nos pontos de coordenadas correspondentes ao local das duas boias. Esta interpolação de valores energéticos é muito importante na medida em que os modelos numéricos existentes fazem estimativas em cada ponto da grelha e muitas vezes é útil fazer estimativas em pontos específicos onde não há um ponto da grelha. Assim, o objetivo nesta fase do projeto é fazer uma interpolação dos quatro pontos mais perto de cada boia e, atribuindo um determinado peso à estimativa energética de cada ponto da grelha, fazer a estimativa correspondente na localização de cada boia. Tendo os valores energéticos anuais (2016 e 2017) estimados por via da interpolação é possível fazer a comparação com os resultados já obtidos anteriormente. Pretende-se ainda mostrar que uma simples interpolação linear é suficiente para validar resultados provenientes destes modelos nas localizações de estudo.

## 5.1 Levantamento de Dados da Plataforma *Copernicus*

O CMEMS disponibiliza um conjunto de serviços orientados para estudos de investigação relacionados com parâmetros marítimos. Todos os serviços da plataforma são disponibilizados em ficheiros .netCDF (descritos na secção 2.3.5). O ficheiro obtido é caracterizado por variáveis e dimensões. Existem três dimensões: tempo, latitude e longitude. Cada par latitude/longitude contém uma série temporal de dados com os valores hora a hora de cada variável no período temporal designado: altura significativa e período médio (17544 estimativas ao longo de 2016 e 2017).

O modelo de ondas utilizado para este estudo foi do IBI-MFC (*Iberian-Biscay-Ireland Monitoring Forecasting Centre*), gerido pela AEMET-PdE (*Agência Estatal de Meteorologia - Puertos del Estado*) e é baseado no modelo MFWAM da *Meteo France* [23].

De seguida estão apresentadas todas as características do ficheiro obtido.

- **Título:** "Wave hourly instantaneous fields for the Iberia-Biscay-Ireland (IBI) region".
- **Instituição:** Aemet-Puertos del Estado (Aemet-PdE)
- **Fonte:** IBI-MFC (PdE Production Center)
- **Referência:** <http://marine.copernicus.eu/>
- **Cobertura Geográfica:** Latitude Mínima - 35°Norte; Latitude Máxima - 45° Norte; Longitude Mínima - (-12)° Este; Longitude Máxima - (-6)° Este.
- **Cobertura Temporal:** de 2016-01-01T00:00:00Z a 2017-12-31T23:00:00Z
- **Variáveis:** TM02 - Período Médio; VHM02 - Altura Significativa.
- **Dimensões:** Data, Longitude (°Este), Latitude(°N).
- **Resolução Espacial:** 0.1°×0.1°
- **Resolução Temporal das Estimativas:** hora a hora.

## 5.2 Metodologia Utilizada

Uma vez reunidos o conjunto de dados é necessário utilizar uma metodologia, seja na organização dos dados ou na interpolação, que torne representativa a estimativa energética nas duas localizações de estudo.

De forma a poder utilizar os dados existentes e manipula-los de forma idêntica à que foi feita anteriormente, é necessário que após a leitura do ficheiro `.netCDF`, sejam agrupados os valores dos parâmetros das ondas em *data frames* indexados por data e hora. Para isso, é utilizada a biblioteca *xarray*<sup>6</sup> do *Python* para abrir o ficheiro e selecionar as variáveis pretendidas nas localizações especificadas por latitude e longitude. Através de uma função da biblioteca *pandas* é possível converter essa seleção de dados numa *data frame*.

Nas tabelas 5.1 e 5.2 estão representadas as coordenadas dos quatro pontos mais próximos da localização de cada boia. Uma vez que a resolução espacial da grelha é  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , encontram-se os quatros pontos avançando e diminuindo uma casa decimal aos valores de latitude e longitude das coordenadas das boias.

Tabela 5.1: Coordenadas dos pontos geográficos da grelha mais próximos da localização da boia Monican01.

Localização	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Monican01	39,51	-9,64
P1	39,5	-9,7
P2	39,6	-9,7
P3	39,6	-9,6
P4	39,5	-9,6

Tabela 5.2: Coordenadas dos pontos geográficos da grelha mais próximos da localização da boia Monican02.

Localização	Latitude (°N)	Longitude (°E)
Monican02	39,56	-9,21
P1	39,5	-9,3
P2	39,6	-9,3
P3	39,6	-9,2
P4	39,5	-9,2

Complementando a informação das tabelas, na figura 5.1 estão representados geograficamente os quatro pontos mais próximos de cada boia a vermelho e a representação das mesmas a verde.

<sup>6</sup>*Xarray*: <https://pypi.org/project/xarray/>



Figura 5.1: Representação geográfica dos quatro pontos da grelha mais próximos de cada boia.

Sabendo as coordenadas geográficas de cada ponto, são selecionadas as séries temporais que contêm os valores das variáveis Altura Significativa e Período Médio, adicionando uma coluna para estimar a potência por frente de onda a cada hora. Esta estimativa é feita com base na equação 3.4. Para cada ponto da grelha é criada uma *data frame* indexada por data e hora com cinco colunas de dados: latitude, longitude, período médio, altura significativa e potência por frente de onda (apêndices A.1 e A.2). O objetivo é caracterizar a energia anual (2016 e 2017) em cada um destes pontos.

Para estimar a energia anual em cada um destes pontos, foi aplicada a fórmula representada pela equação 3.5, ou seja, dada pelo somatório das potências em cada hora, ao longo de cada ano.

Depois de estimadas a energia anual em cada uma das oito localizações, é necessário atribuir um peso a cada uma delas no cálculo da energia anual na localização de cada boia. Esta ponderação é feita com base na distância a que cada um dos quatro pontos da grelha está da localização da respetiva boia.

Na figura 5.2 estão representadas geograficamente as distâncias de cada ponto da grelha à respetiva boia. Os valores de d1, d2, d3 e d4 representam, respetivamente, a distância dos pontos P1, P2, P3 e P4 à localização da respetiva boia.

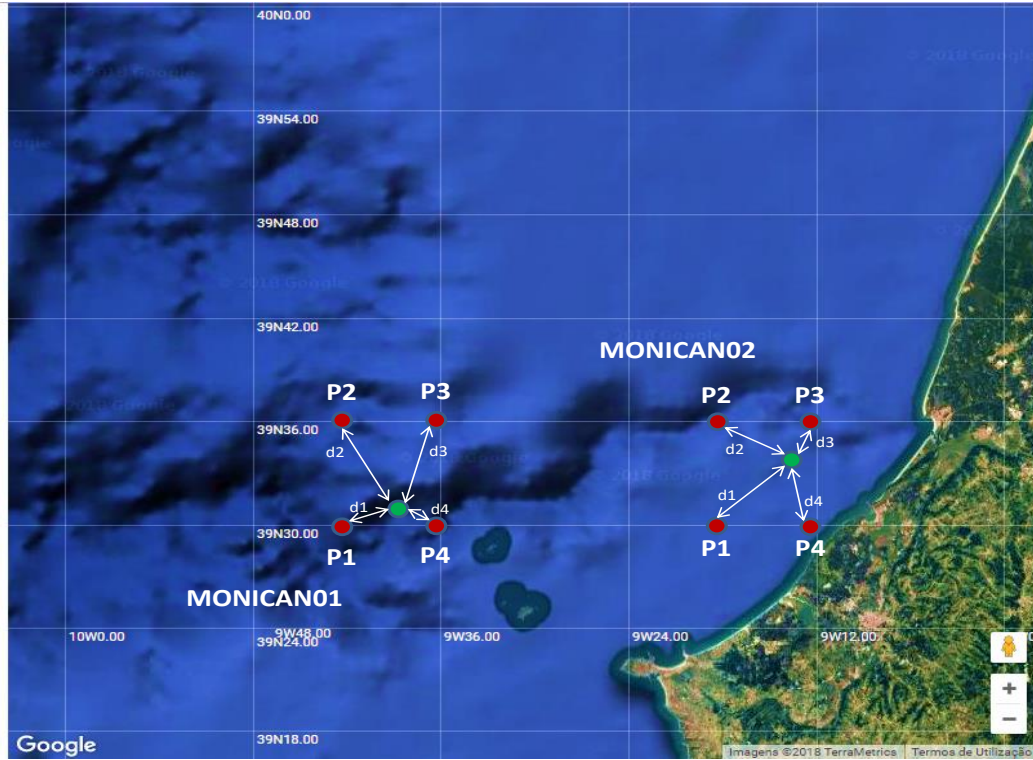


Figura 5.2: Metodologia utilizada na interpolação; distância de cada ponto da grelha às respectivas localizações das boias.

Depois de calculadas a energia anual em cada uma das quatro localizações mais próximas das duas boias, e tendo em conta as distâncias de cada localização à boia, é feita uma interpolação dos valores energéticos para estimar a energia anual nas duas localizações de estudo. Esta interpolação de valores é feita de acordo com a equação 5.1:

$$E_{anual_{0z}} = E_{P1_{anual}} * \frac{d_1}{\sum_{i=1}^4 d_i} + E_{P2_{anual}} * \frac{d_2}{\sum_{i=1}^4 d_i} + E_{P3_{anual}} * \frac{d_3}{\sum_{i=1}^4 d_i} + E_{P4_{anual}} * \frac{d_4}{\sum_{i=1}^4 d_i} \quad (5.1)$$

onde  $E_{P_{x_{anual}}}$  representa a energia anual no ponto  $x$ , as constantes  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  e  $d_4$  representam a distância do respetivo ponto  $x$  à boia em questão e onde  $z$  representa o número da boia. Desta forma são calculadas a energia anual em 2016 e 2017 nas duas localizações.

Na secção seguinte são apresentados os resultados obtidos por via da metodologia descrita nesta secção, a análise dos mesmos e é ainda feita uma comparação com os resultados obtidos anteriormente.

### 5.3 Análise dos Resultados Obtidos

O método de interpolação de valores energéticos dado pela equação 5.1 é aplicado em cada localização de estudo. Por este motivo, a apresentação dos resultados obtidos estão divididos por localização.

#### 5.3.1 Monican01

Sabendo que tem de se repetir o mesmo método para cada ano, em 5.1 existem oito grandezas a calcular antes de aplicar a fórmula:  $E_{P1_{anual}}$ ,  $E_{P2_{anual}}$ ,  $E_{P3_{anual}}$ ,  $E_{P4_{anual}}$  em MWh/m e  $d1$ ,  $d2$ ,  $d3$ ,  $d4$  em km.

As distâncias de cada um dos quatro pontos da grelha à boia Monican01 (tabela 5.3) foram calculadas sabendo os valores de coordenadas de todas estas localizações. Deste modo, verifica-se que o ponto P4 é o que está mais próximo (3,607 km) da localização em que se pretende fazer a estimativa energética. Por outro lado, é o ponto P2 que se encontra mais afastado, a mais de 11 km de distância.

Tabela 5.3: Distância de cada ponto da grelha à localização da boia Monican01.

	d1	d2	d3	d4
Monican01	5,266 km	11,25 km	10,58 km	3,607 km

Utilizando a metodologia descrita na secção 5.2 foram calculadas a energia anual por frente de onda em cada uma das quatro localizações. Na tabela 5.4 encontram-se esses mesmos valores e ainda os valores energéticos anuais por via da interpolação, na localização da boia Monican01.

Como resultado final, por via desta metodologia estima-se um potencial energético de cerca de 286,5 MWh/m em 2016 e cerca de 235,2 MWh/m em 2017, na localização da boia Monican01 .

Tabela 5.4: Estimativa energética para os quatro pontos da grelha mais próximos da boia Monican01; estimativa energética anual para a localização da boia Monican01.

Localização	$E_{2016}$ (MWh/m)	$E_{2017}$ (MWh/m)
P1	286,84072	235,41366
P2	288,89625	237,2409
P3	285,27906	234,2229
P4	281,90888	231,22039
<b>Monican01</b>	<b>286,476</b>	<b>235,180</b>

### 5.3.2 Monican02

Procedendo de forma idêntica à outra localização, nesta verifica-se que o ponto mais perto da boia Monican02 é o P3, estando distanciado cerca de 4,5 km, enquanto que o ponto mais longe é o P1, a mais de 10 km de distância.

Tabela 5.5: Distância de cada ponto da grelha à localização da boia Monican02.

	d1	d2	d3	d4
Monican02	10,2 km	8,904 km	4,53 km	6,727 km

Aplicando novamente a fórmula 5.1 para cada ano e substituindo os valores de distância à boia apresentados na tabela 5.5 e os valores energéticos anuais de cada ponto apresentados na tabela 5.6, estima-se a energia anual por frente de onda na localização desejada. Em 2016 estima-se cerca de 257,15 MWh/m e em 2017 quase 211,7 MWh/m.

Tabela 5.6: Estimativa energética para os quatro pontos da grelha mais próximos da boia Monican02; estimativa energética anual para a localização da boia Monican02.

Localização	$E_{2016}$ (MWh/m)	$E_{2017}$ (MWh/m)
P1	255,12273	210,253
P2	266,5847	218,8758
P3	252,34738	207,15264
P4	250,97398	207,31956
<b>Monican02</b>	<b>257,150</b>	<b>211,669</b>

### 5.3.3 Comparação de Resultados

Perante os resultados apresentados na tabela 5.7, é possível concluir que a interpolação feita a partir dos quatro pontos geográficos mais próximos da localização de cada boia é representativa e concordante com a estimativa feita a partir dos dados provenientes do modelo do MARETEC. Existe, como era esperado, um erro de estimação uma vez que utilizando os dados da localização exata obtém-se estimativas mais perto das reais. Utilizando esta metodologia, os resultados obtidos têm uma variação percentual em relação aos que foram obtidos no capítulo 4. Pretende-se que a variação percentual que se verifica seja a mínima possível, para que a metodologia de interpolação utilizada seja representativa e reproduza resultados de qualidade.

Para a localização da boia Monican01 verificou-se que em 2016, os dados interpolados diminuíram em cerca de 1% do que se tinha estimado anteriormente, com  $E_{MARETEC} = 289,23$  MWh/m e  $E_{Copernicus} = 286,476$  MWh/m. Também em 2017 se verificou uma diminuição de pouco mais de 1% em relação ao que se tinha estimado para a localização exata da boia, tendo  $E_{MARETEC} = 238,15$  MWh/m e  $E_{Copernicus} = 235,18$  MWh/m.

Para a localização da boia Monican02, refletiu-se o contrário, pois houve um aumento percentual dos dados interpolados em relação aos resultados referentes à localização exata da boia. Em 2016 houve um aumento de 3,3 % e em 2017 um aumento de 3,45 %.



Utilizando a mesma metodologia para ambas as localizações, refletiu-se uma variação percentual menor na localização mais longe da zona costeira, enquanto que para a localização mais perto da costa, a variação percentual subiu a cima dos 3%. De um modo geral pode-se concluir que a metodologia utilizada foi precisa, tendo em conta que a fonte de dados não era a mesma, logo, à partida não seria de esperar resultados exatamente iguais. Os modelos de ondas utilizados em cada metodologia não foi o mesmo nem operado pelas mesmas entidades.

Tendo em conta o que foi apresentado, a metodologia de interpolação de valores energéticos pode ser aplicada em qualquer ponto da zona de interesse, a fim de analisar quais as áreas mais energéticas que poderão ser aproveitadas.

Tabela 5.7: Comparação de resultados: estimativa na localização exata VS estimativa por via de interpolação.

Localização	Fonte de Dados	$E_{2016}$ (MWh/m)	$E_{2017}$ (MWh/m)
Monican01	MARETEC	289,230	238,031
Monican01	<i>Copernicus</i>	286,476	235,180
Variação Percentual (%)		-0,95	-1,2

Localização	Fonte de Dados	$E_{2016}$ (MWh/m)	$E_{2017}$ (MWh/m)
Monican02	MARETEC	249,010	204,604
Monican02	<i>Copernicus</i>	257,151	211,669
Variação Percentual (%)		3,27	3,45



## CONCLUSÕES FINAIS

Nesta dissertação foi proposto analisar o comportamento dos estados do mar em duas localizações distintas: uma perto da costa e outra ao largo da costa litoral da Nazaré. A análise proposta foi dividida por ano e por localização, permitindo avaliar a variabilidade anual e espacial. Um estado do mar corresponde a um par de parâmetros: altura significativa e período médio das ondas. Estes parâmetros constituíram juntamente com informação direcional das ondas, os dados utilizados como *input*.

Através destes dados foi possível extrair certos tipos de informação. Foram agrupadas as contagens de cada estado do mar em histogramas de duas dimensões, cada uma delas a representar um parâmetro. Esta representação permitiu saber quais são as características do mar que aconteceram com maior frequência.

Também em histogramas a duas dimensões foram construídas matrizes energéticas contendo a informação de quanta energia é disponibilizada por cada estado do mar, tendo em conta a quantidade de tempo que ocorreu. Conclui-se que não são os estados do mar que ocorrem com maior frequência aqueles que mais contribuem para a energia anual em cada localização. Este facto acontece porque na estimativa feita, a potência por frente de onda aumenta com o quadrado de  $H_s$ . Assim, ligeiros aumentos de altura significativa reflete-se num significativo aumento de disponibilidade energética do recurso.

Para complementar o estudo foi ainda feita a análise de picos energéticos, determinando-se que apenas durante os meses de inverno é que ocorrem fenómenos extremos de condições marítimas. Para além de verificar em que alturas do ano estes fenómenos aconteceram, foi ainda calculada a quantidade de tempo que estes ocorreram. Os resultados obtidos mostraram que a localização mais perto da costa apesar de apresentar valores energéticos anuais mais baixos, nela verificaram-se condições extremas do mar menos adversas e com menor período de duração do que se verificou na localização mais longe da costa. Desta forma, conclui-se que a construir uma central de conversão, a zona mais

adequada seria perto da costa, a fim de maximizar a segurança dos dispositivos WEC.

De maneira a analisar a variabilidade energética entre anos e entre localizações, foi calculada a variação energética percentual entre os mesmos meses. Verificou-se que são nos meses de inverno que existe maior discrepância entre 2016 e 2017 no que diz respeito à energia disponível em cada localização. Deste facto conclui-se que devido a condições atmosféricas extremas que podem existir com maior frequência nos meses de inverno, apenas com dois anos de dados históricos é difícil prever como será o comportamento nestes meses nos próximos anos. Pelo contrário, nos meses de verão e outono existem pequenas variações percentuais entre anos. Entre localizações conclui-se que na Monican01 existe um maior potencial energético disponível no recurso em relação à localização Monican02. Isto acontece porque, instantaneamente, se verificam valores mais elevados de altura significativa das ondas longe da costa, ao longo do tempo.

A análise direcional permitiu concluir que durante o período temporal estudado, as ondas dirigiam-se segundo direções no quadrante II da "rosa das ondas". Em caso de conversão de energia de ondas nestas localizações e dependendo da geometria dos dispositivos escolhidos, estes poderão ser orientados segundo a direção noroeste para que não prestem resistência à direção de propagação das ondas do mar. Desta forma é possível aproveitar uma maior quantidade de energia.

### 6.1 Trabalhos Futuros

Após concluído o projeto que foi proposto, seria de esperar que os resultados obtidos fossem conclusivos sobre a decisão de investir ou não numa central de conversão no local de estudo. Contudo, essa decisão engloba inúmeros fatores que são externos ao que foi desenvolvido neste projeto.

A viabilidade económica de um investimento deste calibre depende também de outro tipo de estudos. Designadamente, a natureza geofísica do local é importante no sentido de avaliar quais as formas de transporte de energia existem dependendo do fundo marítimo, condições atmosféricas, etc.

Posteriormente deverá ser feito um estudo detalhado dos dispositivos WEC que podem ser utilizados tendo em conta as características energéticas e geofísicas do local apresentadas nesta dissertação. As matrizes de energia apresentadas podem ser multiplicadas pelas matrizes de desempenho de diferentes conversores a fim de se estimar a energia que é possível converter.

De uma forma geral, o conjunto de informação apresentada neste projeto que caracteriza o potencial energético nas localizações de estudo pode servir de base para estudos de outra natureza, a fim de avaliar com maior precisão a possibilidade de produção de energia elétrica a partir da energia disponível no recurso.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Mørk, S. Barstow, A. Kabuth e M. T. Pontes. “Assessing the global wave energy potential”. Em: *Proc. of 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, ASME, paper. Vol. 20473. 2010.
- [2] G. W. Boehlert, G. R. McMurray e C. E. Tortorici. *Ecological effects of wave energy development in the Pacific Northwest*. NOAA Technical Memorandum NMFS-F/SPO-92, 2008.
- [3] U. A.C.E. R. Centre. *SHORE PROTECTION MANUAL Volume 1*. US Government Printing Office, 1984.
- [4] D. V. Evans e F. d. O. Antonio. *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization: IUTAM Symposium Lisbon/Portugal 1985*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [5] H. E. Krogstad. “LINEAR WAVE THEORY Regular waves”. Em: *Science And Technology* February (2000).
- [6] A. D. Craik. “The origins of water wave theory”. Em: *Annual review of fluid mechanics* 36 (2004).
- [7] M. P. Tulin. “On the transport of energy in water waves”. Em: *Journal of Engineering Mathematics* 58.1 (2007), pp. 339–350.
- [8] S. Wu, C. Liu e X. Chen. “Offshore wave energy resource assessment in the East China Sea”. Em: *Renewable Energy* 76 (2015), pp. 628–636.
- [9] E. Pitt. *Assessment of Wave Energy Resource*. The European Marine Energy Centre Ltd.
- [10] “Fugro”[Online]. URL: [www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/seawatch-metocean-buoys-and-sensors](http://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/technology/seawatch-metocean-buoys-and-sensors).
- [11] H. Smith, D. Haverson, G. H. Smith, C. S. Cornish e D. Baldock. “Assessment of the wave and current resource at the wave hub site”. Em: *PRIMaRE report for Wave Hub, UK* (2011).
- [12] “South African Environmental Observation Network - SAEON”[Online]. URL: <http://app01.saeon.ac.za/sadcofunstuff/>.
- [13] “MEDCLIC”[Online]. URL: [www.medcllic.es](http://www.medcllic.es).

- [14] J. P.-Y. Maa e H. K. Ha. "X-band radar wave observation system". Em: *Field Testing of a Physical/Biological Monitoring Methodology for Offshore Dredging and Mining Operations* 56 (2005).
- [15] J. Falnes. "A review of wave-energy extraction". Em: *Marine Structures* 20.4 (2007), pp. 185–201.
- [16] B. Cahill e T. W. Lewis. "Wave Energy Resource Characterization and the Evaluation of Potential Wave Farm Sites". Em: *Proceedings OCEANS 2011 January 2011* (2011).
- [17] A. Luadsong e N. Aschariyaphotha. "The Splitting Upwind Schemes for Spectral Action Balance Equation". Em: *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering* 5.6 (2011), pp. 899–907.
- [18] "Centro de Previsão Meteorológica para Médio Alcance - ECMWF"[Online]. URL: [www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction/marine](http://www.ecmwf.int/en/research/modelling-and-prediction/marine).
- [19] "British Oceanographic Data Centre"[Online]. URL: [www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/254628/](http://www.bodc.ac.uk/data/documents/nodb/254628/).
- [20] "Ocean Weather Inc"[Online]. URL: [www.oceanweather.com/metocean/nat150](http://www.oceanweather.com/metocean/nat150).
- [21] "Met Office"[Online]. URL: [www.metoffice.gov.uk/research/weather/ocean-forecasting/ocean-verification](http://www.metoffice.gov.uk/research/weather/ocean-forecasting/ocean-verification).
- [22] "Mercator Ocean"[Online]. URL: [www.mercator-ocean.fr/en/mercator-ocean/copernicus/](http://www.mercator-ocean.fr/en/mercator-ocean/copernicus/).
- [23] "Copernicus Marine Environment Monitoring Service"[Online]. URL: <http://marine.copernicus.eu>.
- [24] "NOAA/NESDIS/STAR Laboratory for Satellite Altimetry"[Online]. URL: [www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/AltBathy/](http://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/AltBathy/).
- [25] *Copernicus Europe's eyes on Earth* [ONLINE]. URL: [www.copernicus.eu/data-access](http://www.copernicus.eu/data-access).
- [26] H. Jenter e R. Signell. "NetCDF: A public-domain software solution to data-access problems for numerical modelers". Em: (...) *Conference on Estuarine and Coastal Modeling* (1992).
- [27] "Instituto Hidrográfico"[Online]. URL: [www.hidrografico.pt/noticia-ondas-gigantes-nazare.php](http://www.hidrografico.pt/noticia-ondas-gigantes-nazare.php).
- [28] "Monican"[Online]. URL: <http://monican.hidrografico.pt>.
- [29] "Marine Environment and Technology Centre - MARETEC"[Online]. URL: [www.maretec.org/pt/](http://www.maretec.org/pt/).
- [30] "IPMA"[Online]. URL: [www.ipma.pt/pt/maritima/hs/](http://www.ipma.pt/pt/maritima/hs/).

- [31] A. de Andres, R. Guanche, C. Vidal e I. J. Losada. “Adaptability of a generic wave energy converter to different climate conditions”. Em: *Renewable Energy* 78 (2015), pp. 322–333.





# APÊNDICE

## A.1 Metodologia Utilizada na Organização dos Dados (Monican01)

time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2016-01-01 00:00:00	-9.7	39.5	12.750000	3.90	95.411102
2016-01-01 01:00:00	-9.7	39.5	12.740000	3.90	95.336266
2016-01-01 02:00:00	-9.7	39.5	12.730000	3.91	95.750580
2016-01-01 03:00:00	-9.7	39.5	12.719999	3.92	96.165367
2016-01-01 04:00:00	-9.7	39.5	12.710000	3.92	96.089775
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2016-01-01 00:00:00	-9.7	39.599998	12.74	3.92	96.316582
2016-01-01 01:00:00	-9.7	39.599998	12.73	3.92	96.240974
2016-01-01 02:00:00	-9.7	39.599998	12.71	3.93	96.580658
2016-01-01 03:00:00	-9.7	39.599998	12.69	3.94	96.920021
2016-01-01 04:00:00	-9.7	39.599998	12.67	3.95	97.259109
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2016-01-01 00:00:00	-9.6	39.599998	12.759999	3.89	94.996880
2016-01-01 01:00:00	-9.6	39.599998	12.759999	3.90	95.485924
2016-01-01 02:00:00	-9.6	39.599998	12.759999	3.90	95.485924
2016-01-01 03:00:00	-9.6	39.599998	12.750000	3.91	95.901009
2016-01-01 04:00:00	-9.6	39.599998	12.740000	3.91	95.825790
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2016-01-01 00:00:00	-9.6	39.5	12.759999	3.86	93.537285
2016-01-01 01:00:00	-9.6	39.5	12.770000	3.86	93.610596
2016-01-01 02:00:00	-9.6	39.5	12.770000	3.87	94.096252
2016-01-01 03:00:00	-9.6	39.5	12.770000	3.87	94.096252
2016-01-01 04:00:00	-9.6	39.5	12.759999	3.87	94.022560

Figura A.1: Construção das *data frames* para os quatro pontos mais próximos da Monican01; *VTM10* - Período Médio; *VHM0* - Altura Significativa.

## A.2 Metodologia Utilizada na Organização dos Dados (Monican02)

time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2015-12-31 23:00:00	-9.3	39.5	12.889999	3.72	87.760345
2016-01-01 00:00:00	-9.3	39.5	12.950000	3.69	86.752495
2016-01-01 01:00:00	-9.3	39.5	13.009999	3.68	86.682686
2016-01-01 02:00:00	-9.3	39.5	13.080000	3.67	86.676102
2016-01-01 03:00:00	-9.3	39.5	13.130000	3.67	87.007431
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2015-12-31 23:00:00	-9.3	39.599998	12.82	3.82	92.039497
2016-01-01 00:00:00	-9.3	39.599998	12.86	3.79	90.882210
2016-01-01 01:00:00	-9.3	39.599998	12.92	3.78	90.825050
2016-01-01 02:00:00	-9.3	39.599998	12.96	3.77	90.624832
2016-01-01 03:00:00	-9.3	39.599998	12.99	3.77	90.834618
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2015-12-31 23:00:00	-9.2	39.599998	12.830000	3.74	88.293633
2016-01-01 00:00:00	-9.2	39.599998	12.889999	3.72	87.760345
2016-01-01 01:00:00	-9.2	39.599998	12.950000	3.70	87.223335
2016-01-01 02:00:00	-9.2	39.599998	13.009999	3.69	87.154427
2016-01-01 03:00:00	-9.2	39.599998	13.059999	3.68	87.015831
time	longitude	latitude	VTM10	VHM0	Power
2015-12-31 23:00:00	-9.2	39.5	12.969999	3.72	88.305016
2016-01-01 00:00:00	-9.2	39.5	13.049999	3.69	87.422394
2016-01-01 01:00:00	-9.2	39.5	13.110000	3.68	87.348969
2016-01-01 02:00:00	-9.2	39.5	13.190000	3.67	87.405022
2016-01-01 03:00:00	-9.2	39.5	13.259999	3.66	87.390686

Figura A.2: Construção das *data frames* para os quatro pontos mais próximos da Monican02; *VTM10* - Período Médio; *VHM0* - Altura Significativa.